

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԿՄԱՐԱԿՐԱԿԱՆ ԿՈՒՆԵՐԱԿ

Կասյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղունգ Շ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղափոխ.), Ալեխանյանի Վ. Վ.,
Անանյան Ա. Կ., Գրիգորյան Տ. Ա., Զալոյան Մ. Ա., Նազուրով Ա. Գ., Տեր-Ազատե Ի. Ա., Փինաժյան
Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ)
Փաստափրանախոս քարտուղար Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ редактор), Агунг Г. Т. (зам. ответ. редактора), Алексеевский
В. В., Ананян А. К., Григорян Т. А., Залоян М. А., Назаров А. Г., Пинажян В. В. (зам.
ответ. редактора), Тер-Азарян И. А.
Ответственный секретарь Степанян З. К.

Խմբագրությունը գտնվում է Երևանում—1, Արտվան փող. 15.

Адрес редакции: Ереван—1, ул. Абоняна, 15.

ЭНЕРГЕТИКА

Г. Т. АДОНЦ

К ИССЛЕДОВАНИЯМ СХОДИМОСТИ И СКОРОСТИ ИТЕРАЦИИ
В РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Для решения системы нелинейных и трансцендентных уравнений, которыми описываются установившиеся режимы энергосистемы, используются [1-5] методы итерации и различные его модификации (метод Гаусса с ускоряющими коэффициентами, метод Ньютона-Рафсона, метод с обращением матрицы параметров уравнений и др.).

Независимо от методов решения этих уравнений, имеют место случаи несходящихся итераций или сходящихся к физически нереализуемым решениям, и частности, в расчетах режимов, близких к предельным по устойчивости.

В этой связи проблема сходимости итерации и расчетах установившихся режимов энергосистем продолжает служить объектом исследований [6]. Задача сходимости итерации непосредственно связывается также с вопросом обеспечения определенной скорости расчета для достижения нужной точности или допустимой невязки между заданными и полученными в результате расчета величинами.

Исследования сходимости и скорости итерации в расчетах установившихся режимов ряда энергосистем, проводимые в Арм. НИИ энергетики, показали, что сходимость и скорость итерации зависят от целого ряда факторов. К их числу относятся, например, следующие.

Представление параметров системы коэффициентами уравнений узловых напряжений или матрицей Y многополюсника (узловых проводимостей).

Задание режима генераторных узлов системы величинами P и Q (активные и реактивные мощности) или P и U (модуль напряжения). Решение исходных уравнений методами простой итерации или Гаусса, или методами с использованием ускоряющих итерацию коэффициентов. Весьма важным представляется также применение способов, обеспечивающих сходимость итерации к точке, находящейся в области заданных параметров искомого режима.

Предлагаемый алгоритм расчета и программа, реализующая его на ЭВМ «Урал-14Д», позволяют вести не только расчет установившегося режима системы, но и исследовать процесс сходимости итерации и

ее скорость с целью определения влияния изложенных факторов на расчет режима данной схемы энергосистемы.

С помощью данного алгоритма можно выполнить также ряд вычислительных экспериментов и исследований, связанных с проблемой сходимости итерации при решении системы нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений, встречающихся в различных областях техники.

Постановка задачи. Принимаются заданными: а) $[Y]$ -матрица коэффициентов уравнений узловых напряжений схемы замещения системы или $[Y_{экв}]$ -матрица, эквивалентная предыдущей, представляющая собственные и взаимные комплексные проводимости генераторных и нагрузочных узлов системы, общим числом N . Эту матрицу называют также Y -матрицей многополюсника. Для матриц $[Y]$ и $[Y_{экв}]$ принято также общее название матриц узловых проводимостей.

б. Разбиения множества узлов N многополюсника $N = \{1, 2, \dots, n\}$ на два подмножества (N_a, N_f) и (N_f, N_m) , обладающие следующими свойствами:

$N_a \cup N_f = N$, если $x \in N_a$, $z \in N_f$, то $x < z$;

$N_f \cup N_m = N$, если $f \in N_f$, $m \in N_m$, то $f < m$.

в. Величины $|P_a^0|$, $|\phi_a^0|$, $|Q_f^0|$, $|U_m^0|$ активной мощности, фаз напряжений, реактивной мощности и модулей напряжений соответственно узлов a, z, f, m .

г. Начальные значения величин $|\phi_a^0|$, $|P_f^0|$, $|U_f^0|$, $|Q_m^0|$, подлежащих определению.

д. Нижняя и верхняя границы изменения искомых модулей напряжений $U_f^{\min}$, $U_f^{\max}$ для узлов $f \in N_f$.

е. Числа q_a , q_f , используемые для ограничения величин приращений $\Delta\phi_a$, ΔU_f искомых неизвестных ϕ_a , U_f в процессе итерации. Согласно принципу сжатых отображений $0 < q_a < 1$, $0 < q_f < 1$.

ж. Величина $\varepsilon(P_a)$, используемая в качестве критерия прекращения процесса итерации.

з. Числовые значения $K_a = 0, 1, 2, \dots$, соответствующие критичности повторения расчетов на каждом из четырех этапов $\alpha = 1, 2, 3, 4$ расчета, из которых складывается каждый цикл итерации.

Принимаются искомыми: величины $|\phi_a|$, $|P_f|$, $|U_f|$, $|Q_m|$, соответственно для узлов a, z, f, m .

Для величин, получаемых в i -м шаге итерации, используются обозначения: $|\phi_a^i|$, $|P_f^i|$, $|U_f^i|$, $|Q_m^i|$.

Уравнения и выражения, используемые в данном алгоритме. В качестве основных здесь используются уравнения [2], в которых принимаются независимыми переменные $|P_a|$, $|\phi_a|$, $|Q_f|$, $|U_m|$, а искомыми — $|\phi_a|$, $|U_f|$, $|P_f|$, $|Q_m|$.

Величины $|U_f^i|$ должны находиться в заданных границах, определяемых неравенствами

$$U_f^{\min} < U_f < U_f^{\max},$$

где $\min$ и $\max$ — индексы нижней и верхней грани.

Приращения искомых величин ψ_a и U_f в двух последовательных шагах итерации обозначим через

$$\Delta\psi_a^i = \psi_a^i - \psi_a^{i-1} \quad \text{и} \quad \Delta U_f^i = U_f^i - U_f^{i-1}.$$

Очевидно, в качестве ψ_a^{i-1} и U_f^{i-1} в первом ($i=1$) шаге итерации должны быть взяты задаваемые начальные значения этих переменных, т. е. ψ_a^0 и U_f^0 .

m -нормы векторов $|\Delta\psi_a|$ и $|\Delta U_f|$, определяемые после первого шага итерации, обозначим через

$$M_a = \max_a |\psi_a^{i-1} - \psi_a^{i-0}|,$$

$$M_f = \max_f |U_f^{i-1} - U_f^{i-0}|.$$

Взамен m -нормы могут быть использованы k -нормы этих векторов, которые вычисляются соответственно по формулам:

$$M_a = \sqrt{\sum_{a \in N_a} |\psi_a^{i-1} - \psi_a^{i-0}|^2}, \quad (1)$$

$$M_f = \sqrt{\sum_{f \in N_f} |U_f^{i-1} - U_f^{i-0}|^2}. \quad (2)$$

Фазы напряжений всех узлов, т. е. α и β , приводятся к отсчету по изменяемому в каждом шаге итерации значению фазы напряжения балансирующего узла согласно следующим формулам:

$$\psi_k^0 = \psi_k^i - \psi_a^i, \quad k \in N \quad (3)$$

где

$$\psi_a^i = \frac{1}{2} (\psi_{\max}^i + \psi_{\min}^i), \quad (4)$$

$\psi_{\max}^i, \psi_{\min}^i$ — наибольшее и наименьшее значения ψ из числа всех ψ , полученных после расчета в первом шаге итерации, и всех ψ_a^0 , заданных в качестве известных параметров режима.

b — индекс узла баланса системы.

Невязки активных ΔP_a^i и реактивных ΔQ_f^i мощностей узлов α и f после i -го шага итерации определяются по формулам:

$$\Delta P_a^i = P_a^0 - U_a^i \sum_{k \in N} U_k^i C_{ak}^i, \quad \alpha \in N, \quad (5)$$

$$\Delta Q_f^i = Q_f^0 - U_f^i \sum_{k \in N_f} U_k^i S_{fk}^i, \quad f \in N_f \quad (6)$$

где

$$C_{ak}^i = g_{ak} \cos(\psi_a^i - \psi_k^i) - b_{ak} \sin(\psi_a^i - \psi_k^i), \quad (7)$$

$$S_{jk}^i = g_{jk} \sin(\varphi_j^i - \varphi_k^i) + b_{jk} \cos(\varphi_j^i - \varphi_k^i). \quad (8)$$

P_c^i , Q_f^i — заданные параметры режима;

g , b — заданные параметры многополюсника.

$\delta\varphi_\alpha^i$ и δU_f^i — приросты, обеспечивающие ускорение итерации при расчетах φ_α и U_f .

$$\left[\frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i} \right] \cdot \left[\delta \varphi_\alpha^i \right] = \left[\Delta P_c^i \right]; \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i} \right] \cdot \left[\delta U_f^i \right] = \left[\Delta Q_f^i \right]. \quad (10)$$

где c — строчный индекс, пробегающий значения α ;

α — индекс, пробегающий значения f ;

α, f — индексы столбцов;

$\frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i}$, $\frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i}$ — частные производные, вычисляемые согласно [7];

ΔP_c^i , ΔQ_f^i — невязки, определяемые по формулам (5) + (8) с соответствующей заменой индексов.

Взамен уравнений (9) и (10), обеспечивающих нахождение $\delta\varphi_\alpha^i$ и δU_f^i в результате их совместного решения, могут быть использованы следующие формулы (11) и (12), обеспечивающие вычисления $\delta\varphi_\alpha^i$ и δU_f^i по строчным уравнениям систем (9) и (10).

$$\delta\varphi_\alpha^i = \frac{1}{\frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i}} \left(\Delta P_c^i - \sum_{\alpha \in N_\alpha} \frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i} \delta\varphi_\alpha^i \right); \quad (11)$$

$$\delta U_f^i = \frac{1}{\frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i}} \left(\Delta Q_f^i - \sum_{f \in N_f} \frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i} \delta U_f^i \right). \quad (12)$$

где ΔP_c^i , ΔQ_f^i — приращения искомых величин φ_α ($\alpha \in N_\alpha$) и U_f ($f \in N_f$) в двух последних шагах итерации.

В задачах с $n-1$ неизвестными φ_α и U_f могут быть использованы и следующие уравнения для определения приростов $\delta\varphi_\alpha^i$ и δU_f^i .

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i} & \frac{\partial P_c}{\partial U_f^i} \\ \frac{\partial Q_f}{\partial \varphi_\alpha^i} & \frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta\varphi_\alpha^i \\ \delta U_f^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_c^i - \sum_{\alpha \in N_\alpha} \frac{\partial P_c}{\partial \varphi_\alpha^i} \delta\varphi_\alpha^i - \sum_{f \in N_f} \frac{\partial P_c}{\partial U_f^i} \delta U_f^i \\ \Delta Q_f^i - \sum_{\alpha \in N_\alpha} \frac{\partial Q_f}{\partial \varphi_\alpha^i} \delta\varphi_\alpha^i - \sum_{f \in N_f} \frac{\partial Q_f}{\partial U_f^i} \delta U_f^i \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Система (13) из двух уравнений с неизвестными $|\delta\varphi_\alpha^i|$ и $|\delta U_f^i|$ решается для всех значений $c \in N_\alpha$, $c < n$.

Ускоренные значения искомых величин $|\varphi_\alpha^{i+1}|$, $|U_f^{i+1}|$ определя-

ются согласно (14) и (15).

$$\psi_a^{i+1} = \psi_a^i + \delta\psi_a^i, \quad a \in N_a; \quad (14)$$

$$U_f^{i+1} = U_f^i + \delta U_f^i, \quad f \in N_f. \quad (15)$$

где $\{\delta\psi_a^i\}$, $\{\delta U_f^i\}$ — приросты, найденные в результате решения (9), (10) или (11), (12) или (13) в каждом i -м шаге итерации.

Величины приращений $\{\Delta\psi_a^i\}$, $\{\Delta U_f^i\}$ и приростов $\{\delta\psi_a^i\}$, $\{\delta U_f^i\}$ согласно условиям теоремы о сжимающем отображении, должны быть меньше соответственно величин $q_a^i M_a$ и $q_f^i M_f$, т. е.

$$|\Delta\psi_a^i| \leq q_a^{i-1} M_a, \quad a \in N_a, \quad (16)$$

$$|\delta\psi_a^i| \leq q_a^{i-1} M_a, \quad a \in N_a, \quad (17)$$

$$|\Delta U_f^i| \leq q_f^{i-1} M_f, \quad f \in N_f, \quad (18)$$

$$|\delta U_f^i| \leq q_f^{i-1} M_f, \quad f \in N_f, \quad (19)$$

где $(i-1)$ — показатель степени, равный номеру шага итерации — 1; M_a , M_f — нормы векторов;

q_a , q_f — числа в пределах 0,90–0,99, задаваемые в качестве исходной информации.

В качестве критерия для прекращения итераций рекомендуется величина

$$\varepsilon \leq P_i^1 - P_{i-1}^1, \quad \varepsilon = 0,05 \div 0,10. \quad (20)$$

Кроме использования в процессе итерации указанных формул, после завершения итерации выполняется ряд вычислительных операций, связанных с определением тока I_k , их фаз γ_k для всех узлов $k \in N$, а также величин потерь активной p и реактивной q мощностей

$$I_k = \frac{1}{U_k} \sqrt{P_k^2 + Q_k^2}, \quad (21)$$

$$\gamma_k = \varphi_k - \varphi_k, \quad \text{где} \quad \varphi_k = \arctg \frac{Q_k}{P_k}. \quad (22)$$

Разбиение алгоритма расчета на отдельные этапы. Предлагаемый алгоритм складывается из четырех этапов расчета, а именно: первый этап — расчеты ψ_a ; второй — расчеты $\delta\psi_a$; третий — расчеты U_f и четвертый — расчеты δU_f . Допускается возможность K_a -кратного повторения каждого из этих этапов расчета, путем задания в программе значений $K_a = 0, 1, 2, \dots$, где $a = 1, 2, 3, 4$ — индекс указанных четырех этапов расчета.

Возможные схемы итерации. Путем подбора различных значений 0, 1, 2, ... для коэффициентов $k_1 \div k_4$ можно получить различные

схемы итерации. Эти схемы могут быть условно обозначены следующим образом:

а) схема ${}^a\psi, \psi, {}^b\psi, {}^c\psi, U, U^*$. Соответствует: $k_1 = 2; k_2 = 2; k_3 = 2; k_4 = 0$;

б) схема ${}^a\psi, U^*$. Соответствует: $k_1 = 1; k_2 = 0; k_3 = 1; k_4 = 0$;

в) схема ${}^a\psi, {}^bU^*$. Соответствует: $k_1 = 0; k_2 = 1; k_3 = 0; k_4 = 1$, и т. д.

На базе таких схем итерации легко выполнить исследования сходимости итерации.

Предлагаемые схемы итерации могут быть использованы также для исследований сходимости итерации при решении различных задач, описываемых системой из большого числа нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений.

Программа, реализующая алгоритм. Алгоритмы, соответствующие отдельным из возможных схем итерации, например, схемам: ${}^a\psi, U^*$; ${}^a\psi, \psi, {}^b\psi, {}^c\psi, U, U^*$, были реализованы при помощи программ расчетов на ЭВМ «Урал-3».

Разработана также программа расчета на ЭВМ «Урал-14Ц».

В программе предусматриваются следующие возможности расчета режимов электрических систем.

а. Используется вектор $\{v_\varepsilon\} = 0, 1, 2, 3$, где $\varepsilon = 1, 2, 3, 4$ — индекс этапов расчета.

Выбор значения $v_\varepsilon = 0$ означает, что для решения уравнений и ε -м этапе расчета используется компактная схема Гаусса.

Соответственно, $v_\varepsilon = 1$ означает, что в ε -м этапе расчета используется циклический процесс Зейделя.

При $v_\varepsilon = 2$ уравнения решаются путем простой итерации.

При $v_\varepsilon = 3$, где $\varepsilon = 2, 4$ используются строчные уравнения (11) и (12) для получения величин $\{u_{ij}^s\}$ и $\{u_{ij}^v\}$, где $s \in N_s$, $v \in N_v$.

б. Используется вектор $\{v_j\}$, $j = 1-7$, каждый из его компонентов означает:

$v_1 = 1$, если в этапах $\varepsilon = 1, 2$ выбирается норма k ,

$v_1 = 0$, если в $\varepsilon = 1, 2$ выбирается норма m .

$v_2 = 1$, если в $\varepsilon = 3, 4$ выбирается норма k .

$v_2 = 0$, если в $\varepsilon = 3, 4$ выбирается норма m .

$v_3 = 1$, если перед расчетом следует вычислить $|Y_{\text{кв}}|$,

$v_3 = 0$, если не следует вычислять элементы матрицы $[Y_{\text{кв}}]$.

$v_4 = 1$, если этапы 2, 4 совмещаются, т. е. используются (20).

$v_4 = 0$, если этапы 2 и 4 не совмещаются, т. е. не используются (20).

$v_5 = 1$, если расчеты ведутся на базе матрицы $|Y_{\text{кв}}|$,

$v_5 = 0$, если расчеты ведутся на базе $|Y|$ узловых напряжений.

* Составлена математиком—программистом О. И. Солопенко.

$\varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \text{если используются экстракоды с плав. занятой (мантисса — 40),} \\ & \text{порядок 8).} \\ \varepsilon_1 = 0) & 0, & \text{то же, мантисса 24, порядок 8.} \end{cases}$

$\varepsilon_2 = \begin{cases} 1, & \text{если используется арифм. устройство с пл. зпт. У — 345,} \\ & 0, & \text{если используется АУФ с фиксированной запятой.} \end{cases}$

Использование векторов $\{k\}$, $\{x\}$, $\{y\}$ позволяет проводить многоплановый машинный эксперимент по расчету электрических установившихся режимов энергосистем.

Выводы

1. Сходимость и скорость итерации в расчетах электрических режимов энергосистем зависит от целого ряда факторов. К их числу относятся: выбор матрицы проводимостей уравнений узловых напряжений или матрицы проводимостей многополюсника; выбор методов (Гаусса, простой итерации, Ньютона-Рафсона, предлагаемой в статье модификации последнего) при решении системы уравнений фаз и модулей комплексных напряжений; последовательность и кратность решения отдельных систем уравнений; учет ограничений параметров режима и т. д.

2. Предлагаемый алгоритм и программа, реализующая его на ЭВМ «Урал—14Д», позволяет выполнить машинный эксперимент и исследования задачи сходимости и скорости итерации при расчетах электрических режимов энергосистем.

АРМ ПИИЭ

Поступило 20. III. 1972.

2. S. ԱՊՐԱՅ

ԷՆԵՐԳԵԼԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԻՆՏԵՐԱՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐՈՒՄ ԻՏԵՐԱՑԻԱԿԱՆ ԶԱՐԳՈՒՄՈՒՆԵՆ ԵՎ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆՆԵՐԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա. Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Սի շարք էներգահամակարգերի հաստատված սեփմաների հաշվարկները, որոնք կատարվել են Հայկական էներգետիկայի գիտահետազոտական ինստիտուտում, ցույց են տվել, որ խտրացիայի արագությունը և զուգամիտումը կախված են մի շարք գործոններից: Հոդվածում առաջարկվում է ուղղորթ և ծրագիր, կազմված «Մկրալ—14 Դ» էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի համար, որը հնարավորություն է ընձևնում կատարել մեքենայական էրապիրմենտ և էներգահամակարգերի էլեկտրական սեփմաների հաշվարկումներում խտրացիայի զուգամիտման ու արագության խնդիրների հետազոտություն:

ЛИТЕРАТУРА

1. Ward J. B., Hale H. W. Digital computer solution of power-flow problems. "Power Apparatus and Systems", 1955, Dec. №21.
2. Glinn A. F., Stagg G. W. Automatic calculation of load-flow. "Power Apparatus and Systems", 1957, okt. №32.
3. Крумх Я. А. Применение метода Ньютона-Рафсона для расчета стационарного режима сложных электрических систем. «Известия АН СССР Энергетика и транспорт», 1965, № 5.
4. Качанова Н. А. Электрический расчет сложных энергосистем на ЭЦВМ. Киев, «Техника», 1966.
5. Адоиц Г. Т. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистемы с учетом нелинейных характеристик генераторов и нагрузок. «Электричество», 1970, № 2.
6. Адоиц Г. Т. О сходимости итерации к единственному решению в расчетах установившихся режимов электрической системы. «Известия АН СССР Энергетика и транспорт», 1971, № 3.
7. Адоиц Г. Т. Многополюсник. Изд. АН Арм. ССР, 1965.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Я. С. БРОВМАН, К. С. ДЕМИРЧЯН, С. Л. ШМСТЕР

МОДЕЛЬ ВИБРАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Очевидна важность разработки мер по снижению вибраций электрических машин, вызванных производственными дефектами, особенно в свете внедрения ГОСТ 16921—71 (Машины электрические. Нормы вибрации). Для устранения значимых составляющих вибрации необходимо выявление их источников, т. е. вибродиагностика. Поскольку спектр является не только исчерпывающей характеристикой вибрации, но и причин, ее порождающих, для вибродиагностики важно установление связи характеристик дефектов с соответствующими им спектральными составляющими.

Вибрация корпуса асинхронной электрической машины на подшипниках качения возбуждается анизотропией воздействия на ротор и статор вращающихся силовых элементов систем полюсов и шаров. Поскольку магнитные полюсы и шары в сепараторах вращаются асинхронно относительно ротора, здесь возможен единообразный подход на основе рассмотрения взаимодействия асинхронного силового элемента — а. с. э. (полюсы, шары) — с дефектами ротора (некруглости бочки ротора, желобов внутренних колец подшипников) и статора (некруглости расточки статора, наружных колец).

Силовой элемент, имеющий Z_p полюсов (шаров), характеристику силового поля $F_p(\varphi)$ протяженностью φ_p и вращающийся со скоростью ω_p относительно неподвижной системы координат xu (рис. 1), взаимодействует с вращающимся (внутренним) дефектом, имеющим характеристику $F_n(\varphi)$ протяженностью φ_n в связанной с ним вращающейся со скоростью ω_n системе координат, или с неподвижным (наружным) дефектом, имеющим в системе xu характеристику $F_n(\varphi)$ протяженностью φ_n и начальный угол $\varphi_{во}$.

Необходимо установить зависимости спектров вертикального (y) и горизонтального (x) вибродатчиков от характеристик дефектов и а. с. э. Причем вначале простейший характер взаимодействий — дефекты и полюсы сосредоточены, т. е. $\varphi_n, \varphi_p \ll \frac{2\pi}{Z_p}$ и могут рассматриваться как δ -функции. Тогда взаимодействие а. с. э. с дефектами характеризуется произведениями площадей $F_p \times F_n$ или $F_p \times F_n$, причем, для выявления соотношения амплитуд-спектральных составляющих важен лишь относительный масштаб этих величин.

Взаимодействие а. с. э. с неподвижным дефектом в этом случае приводит к последовательности импульсов (решетчатой функции [1]) с частотой повторения $Z_c \omega_c$ (рис. 2, а). Вибрации по осям координат x, y получаются умножением этой последовательности на $\cos \varphi_{\text{н}}$ и $-\sin \varphi_{\text{н}}$, соответственно, т. е. отличаются только по амплитуде. Спектр такой последовательности [2] является гармоническим с амплитудами, равными для всех составляющих (частотой $kZ_c \omega_c$, где $k = 1, 2, 3, \dots$) и равными амплитуде исходных импульсов.

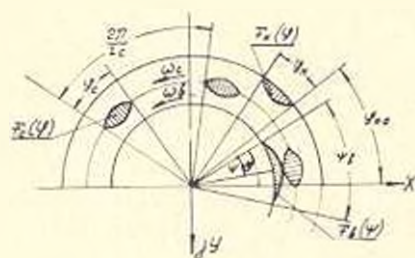


Рис. 1.

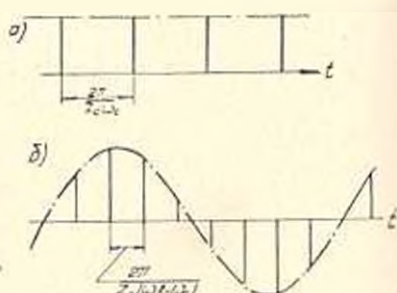


Рис. 2.

Взаимодействие а. с. э. с вращающимся дефектом приводит в вращающейся системе координат к последовательности импульсов по рис. 2, а, но с частотой повторения $Z_c |\omega_n - \omega_c|$, а в неподвижной системе координат вибрации по осям x и y получаются умножением этой последовательности на $\cos \omega_n t$ и $-\sin \omega_n t$, соответственно (рис. 2, б). Спектр такой амплитудно-модулированной последовательности импульсов [2] также характеризуется равными амплитудами всех составляющих, но уже на частоте вращения ω_n и на боковых частотах $kZ_c |\omega_n - \omega_c| \pm \omega_n$, причем, амплитуды составляющих равны половине амплитуды импульсов исходной последовательности. При этом вибрации по осям x и y для всех составляющих спектра сдвинуты между собой на угол $\pi/2$.

Таким образом, воздействие вращающегося дефекта сводится к набору вращающихся векторов вибрации, а неподвижного дефекта — к набору пульсирующих в направлении $\varphi_{\text{н}}$ векторов. Этот вывод, впрочем, очевиден, так как вращающийся дефект не имеет какого-либо преимущественного направления воздействия в неподвижной системе координат: при возникновении же такой анизотропии, связанной с появлением неподвижного дефекта, круговое поле вибрации деформируется в эллиптическое и в пределе (только сосредоточенный неподвижный дефект) вырождается в пульсирующее.

В приведенных рассуждениях динамическая система принималась безынерционной. Если, в первом приближении, полагать динамическую систему линейной и изотропной в пространстве, то спектры по осям x и y должны умножаться на передаточную функцию $W(j\omega)$ системы. Проиллюстрируем это на простейшем примере взаимодействия одного

сосредоточенного полюса (с единичной площадью) с распределенным вращающимся дефектом. Очевидно (рис. 1), элементарное движение вдоль оси x системы с весовой функцией $h(t)$ при воздействии полюса на угле ψ можно записать как

$$dx = F_n(\psi) \cdot d\psi \cdot \cos(\varphi - \psi) \cdot h(\tau), \quad (1)$$

где τ — время, отсчитываемое от момента этого элементарного воздействия.

Принимая при $t=0$ $\varphi - \psi = 0$ и подставляя в (1)

$$\varphi = \omega_n t, \quad \psi = |\omega_n - \omega_c|t,$$

движение $x(t)$ выразим интегралом свертки

$$x(t) = |\omega_n - \omega_c| \int_0^t F_n(|\omega_n - \omega_c|(t - \tau)) \cdot \cos \omega_c(t - \tau) \cdot h(\tau) d\tau. \quad (2)$$

При замене F_n из F_c и $\omega_n = 0$ выражение (2) характеризует движение при взаимодействии с неподвижным дефектом.

Интеграл свертки в области Фурье-изображений (спектр) может быть представлен произведением спектров [2], т. е. спектр вибрации по оси x равен спектру спроектированной на эту ось силы, умноженному на передаточную функцию $W(j\omega)$. Учитывая линейность Фурье-преобразования и линейности системы, этот вывод не изменится при рассмотрении воздействия всех полюсов.

Однако при учете протяженности дефектов и полюсов ($\varphi_n, \varphi_c, \tau_n, \tau_c$) спектры спроектированного на оси x, y взаимодействия $F_n \times F_c$ (или $F_n \times F_c$) суммированием (интегрированием) только по временной области получить не удастся, приходится рассматривать бесконечные суммы спектров последовательностей импульсов, представляющих собой кусочно-непрерывные, обычно почти-периодические функции времени. Поэтому приходится вычислять спектры в два этапа: вначале интегрированием в пространстве для неизменного t находят функции $F_x(t), F_y(t)$, а затем их Фурье-преобразованием определяются спектры.

Рассмотрим первый этап. В комплексной форме

$$\begin{aligned} \bar{F}(t) = F_x(t) + jF_y(t) &= \int_0^{2\pi} F_n(\varphi, t) \cdot F_c(\varphi, t) \cdot F_n(\varphi, t) \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi - \\ &- j \int_0^{2\pi} F_n(\varphi, t) \cdot F_c(\varphi, t) \cdot F_n(\varphi, t) \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как F_n и F_c определены только в пределах $0 : 2\pi$, то (3) не изменится при переходе к пределам $0 : 2\pi$ и, следовательно, (3) пред-

ставляет собой Лапласово (L -) преобразование произведения $F_n F_c F_a$ при параметре $s = j$:

$$\bar{F}(t) = \int_0^{\infty} F_n F_c F_a e^{-j\omega t} d\omega = \int_0^{\infty} F_n F_c F_a e^{-s\omega} d\omega \Big|_{s=j} = L(F_n F_c F_a)_{s=j}. \quad (4)$$

L -преобразование произведения функций равно комплексной свертке их изображений [3]. Даже для характеристик дефектов простейшего вида двойной интеграл свертки в комплексной области получить в компактной форме не удастся. Эта задача решается последовательным численным интегрированием на ЦВМ, а здесь для анализа упростим ее.

Будем рассматривать взаимодействие дефекта в виде полуволны синусоиды с системой сосредоточенных полюсов (рис. 3, а). Такое

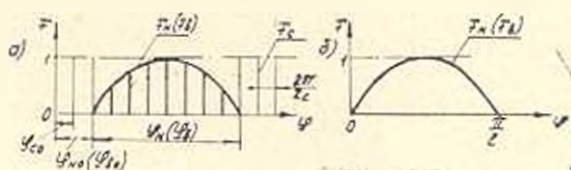


Рис. 3.

представление для шарикоподшипников и многополюсных машин достаточно хорошо согласуется с реальностью и позволяет, с другой стороны, применить эффективный аппарат дискретного (L -) преобразования Лапласа для смещенных решетчатых функций [1]. Выражая протяженность дефекта в долях $(l = 1, 2, 3, \dots) \pi$ радиан (рис. 3, б) и представляя начальные смещения как функции времени

$$t_{00} = \omega_c t, \quad t_{0n} = \omega_c t,$$

получаем (см. Приложение) зависимости, позволяющие анализировать влияние протяженностей дефектов и числа полюсов на комплексный спектр $\bar{F}(t)$. Здесь еще раз подчеркнем существенность последовательности операций: следует вначале осуществлять проектирование (3), (4) взаимодействий и далее рассматривать их спектральное разложение, а не производить спектральное разложение дефекта с последующим проектированием взаимодействий спектральных составляющих дефекта с а. с. э. на координатные оси, что [4] приводит к существенно иным результатам.

Для неподвижного дефекта получаем

$$\bar{F}_n(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{-j k \omega_c t} \quad (5)$$

где комплексные амплитуды C_k определяются по (П.18). Таким образом, вектор $\bar{F}_n(t)$ силового воздействия неподвижного дефекта

представляется в виде гармонического ряда эллипсов вибрации, большие полуоси которых равны

$$|C_{+k}| + |C_{-k}|,$$

и остальные параметры также однозначно характеризуются прямым C_{+k} и инверсным C_{-k} векторами на каждой из частот их вращения kZ_c . Постоянная составляющая воздействия определяется неподвижным вектором C_0 .

Для вращающегося дефекта разложение $F_n(t)$ можно было бы получить из выражения (П.14) с учетом (П.7), однако проще и нагляднее силовое воздействие вращающегося дефекта представить как неподвижного во вращающейся со скоростью ω_n системе координат по рис. 1, т. е. вместо (5) записать

$$\bar{F}_n(t) = \sum_k C_k e^{-j(kZ_c - \omega_c - \omega_n)t} |Z_c| e^{-j\omega_0 t}. \quad (6)$$

Таким образом, вектор $\bar{F}_n(t)$ представляется набором векторов верхних боковых частот $(kZ_c |\omega_n - \omega_c| - \omega_0)$ с амплитудами прямых векторов $|C_{+k}|$ и нижних боковых частот $(kZ_c |\omega_n - \omega_c| - \omega_0)$ с амплитудами инверсных векторов $|C_{-k}|$, а также вектором на частоте вращения ротора ω_n с амплитудой постоянной составляющей воздействия $|C_0|$.

Здесь следует отметить, что учет протяженности дефектов не вносит дополнительных частот в спектр вибраций, найденный ранее из анализа воздействия сосредоточенных дефектов, но позволяет выявить соотношения между амплитудами составляющих спектра применительно к задаче различения дефектов. Однако модель, учитывающая взаимодействие неподвижного и вращающегося протяженных дефектов, позволяет обнаружить и некоторые новые частоты в спектре, например, центральные частоты $kZ_c |\omega_n - \omega_c|$.

Принятая в анализе форма дефекта в виде полуволны синусоиды представляется наиболее общей; очевидно, что пользуясь изложенной в приложении методикой, аналогичные результаты могут быть получены и для других аппроксимаций дефекта, например, прямоугольной, треугольной, пилообразной формы.

Приложение

L — изображение одиночного дефекта $F(z)$ (рис. 3,б) имеет вид:

$$f(s) = L(F(z)) = L\left(\sin lz + \sin l\left(z - \frac{\pi}{l}\right)\right) = \frac{l}{s^2 + l^2} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{l}s}\right). \quad (П.1)$$

Учет смещения на угол $\varphi_{\text{но}}(\varphi_{\text{но}})$ соответствует умножению выражения (П.1) на $e^{-\varphi_{\text{но}}s}$.

При дискретном Лапласовом преобразовании дефекта

$$f^*(s) = D(F(n)) = \sum_{n=1}^{\infty} F(n) e^{-sn} \quad (\Pi.2)$$

номера отсчетов ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

$$n = \frac{\varphi}{2\pi} Z_c = \frac{\varphi}{\omega_c} \quad (\Pi.3)$$

где $\bar{\omega}_c = \frac{2\pi}{Z_c}$ частота (или период повторения) решетчатой функции, если номера отсчетов n считать безразмерным дискретным временем (т. е. $\varphi = \bar{\omega}_c n = \bar{\omega}_c t$).

Для того, чтобы (П.2) соответствовало $\bar{F}(t)$ по (4), необходимо по-прежнему умножать F на $e^{-\bar{\omega}_c t}$, т. е. в (П.2) брать $s = j\bar{\omega}_c$ [вместо $s = j$ в (4)]. "Частота" дефекта соответственно будет:

$$\bar{\omega} = j\bar{\omega}_c = 2\pi \frac{1}{Z_c} \quad (\text{т. е. } \sin lz = \sin \bar{\omega} t). \quad (\Pi.4)$$

Смещения в безразмерной форме выразятся следующим образом: — начальное смещение дефекта

$$sz_0 = jz_0 = j\bar{\omega}_c l, \quad (\Pi.5)$$

где для неподвижного дефекта

$$l_n = \frac{\varphi_{n0}}{\omega_c} = \frac{\varphi_{n0}}{2\pi} Z_c, \quad (\Pi.6)$$

а для вращающегося дефекта

$$l_n = \frac{\varphi_{n0}}{\omega_c} - \frac{\omega_n t}{\omega_c} = \frac{\omega_n Z_c}{2\pi} t, \quad (\Pi.7)$$

— смещение а. с. э. (решетчатой функции)

$$sz_{c0} = jz_{c0} = j\bar{\omega}_c \varepsilon, \quad (\Pi.8)$$

$$\text{где } \varepsilon = \frac{\omega_c l}{\omega_c} = \frac{\omega_c Z_c}{2\pi} t < 1 \quad (\Pi.9)$$

(т. к. взаимодействие повторяется с периодом $\bar{\omega}_c$);

— смещение, обеспечивающее переход от синусоиды к одиночному импульсу (П.1)

$$\frac{\pi}{l} s = \frac{\pi}{l} j = j\bar{\omega}_c \nu, \quad (\Pi.10)$$

$$\text{где } \nu = \frac{Z_c}{2l}. \quad (\Pi.11)$$

Для перехода от l -изображения (П.1) к D -изображению сме-

щенной решетчатой функции $|l|$ вместо (П.2) следует записать

$$f^*(s, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{\infty} F(n + \varepsilon) e^{-sn}. \quad (\text{П.12})$$

Однако искомое в соответствии с (4) выражение

$$\bar{F}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} F(n + \varepsilon) e^{-s(n+\varepsilon)} \Big|_{s=j\omega_c} = e^{-s\varepsilon} f^*(s, \varepsilon) \Big|_{s=j\omega_c}, \quad (\text{П.13})$$

т. е. D -изображение дефекта, следует умножить на оператор сдвига $e^{-s\varepsilon}$, поскольку $\bar{F}(t)$ определено в неподвижной, а не поворачиваемой вместе с решеткой $|l|$ системе координат.

Пользуясь правилами и таблицами $|l|$ прямого D -преобразования, из (П.13) с учетом (П.1) и (П.4)-(П.11) получаем

$$\bar{F}(t) = \bar{F}_1 + \bar{F}_2, \quad (\text{П.14})$$

$$\text{где } \bar{F}_1 = \begin{cases} e^{-j\omega_c \varepsilon} \frac{\sin \omega_c (1 + \varepsilon - (k - |l|)) + e^{-j\omega_c \varepsilon} \sin \omega_c ((k - |l|) - \varepsilon)}{e^{2j\omega_c \varepsilon} - 2e^{j\omega_c \varepsilon} \cos \omega_c + 1} \cdot e^{-j\omega_c (k-|l|)} & \text{при } 0 \leq \varepsilon \leq k - |l| \\ e^{-j\omega_c \varepsilon} \frac{e^{j\omega_c \varepsilon} \sin \omega_c (\varepsilon - (k - |l|)) + \sin \omega_c (1 - \varepsilon - (k - |l|))}{e^{2j\omega_c \varepsilon} - 2e^{j\omega_c \varepsilon} \cos \omega_c + 1} \cdot e^{-j\omega_c (k-|l|)} & \text{при } k - |l| \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases} \quad (\text{П.15})$$

$$\bar{F}_2 = \bar{F}_1, \quad (\text{П.16})$$

знаком $|l|$ обозначается целая часть числа.

$\bar{F}(t)$ изменяется периодически при изменении ε от 0 до 1, поэтому для комплексных коэффициентов C_k ряда Фурье [3] в принятой по рис. 1 системе координат можно записать:

$$C_k = \int_0^1 \bar{F}(\varepsilon) e^{jk2\pi\varepsilon} d\varepsilon = \int_0^{k-|l|} \bar{F}_1(\varepsilon) e^{jk2\pi\varepsilon} d\varepsilon + \int_{k-|l|}^1 \bar{F}_1(\varepsilon) e^{jk2\pi\varepsilon} d\varepsilon + \int_0^{k-|l|} \bar{F}_2(\varepsilon) e^{jk2\pi\varepsilon} d\varepsilon + \int_{k-|l|}^1 \bar{F}_2(\varepsilon) e^{jk2\pi\varepsilon} d\varepsilon. \quad (\text{П.17})$$

После интегрирования и подстановок (П.3), (П.4), (П.6) и (П.11) для неподвижного дефекта окончательно получаем:

$$C_k = \frac{lZ_c}{\pi |l^2 - (kZ_c - 1)^2|} \cos \frac{\pi(kZ_c - 1)}{2l} e^{j\pi Z_c - j\pi k \cos \frac{\pi}{2l}}, \quad (\text{П.18})$$

При возникновении неопределенностей типа $\frac{0}{0}$ (например, при $l=1$ и $k=0$) следует применять обычные методы их раскрытия.

Поступило 20. 11. 1972.

ՏԼ. Ս. ԲՐՈՎՄԱՆ, Կ. Ս. ԳԵՐԵԴՅԱՆ, Ս. Լ. ՇՄՈՒՏԵՐ

ԱՊԱՍԻԿՐՈՆ, ԷԼԵՄԵՆՏԱՐԻՉԻ ՎԻՐՐԱՑԻԱՅԻ ՄՈԴԵԼ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Իրաված է ապասխնիրոն էլեկտրաշարժիչի վիրրացիայի սպեկտրը, որն առաջանում է զնդիկավոր առանցքակալների և սուստր-գաշտ-ստատոր սիստեմի թերութունների պատաստով: Կիրառելով էապասի գիսկրկա վերափոխումները, բացատրաված է սպեկտրի (վիրրացիայի էլիպսի հարմոնիկ շարքի) կախումը թերության պարամետրներից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Цыпкин Я. А. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Физматгиз, 1962.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. Изд-во «Наука», 1965.
4. Писарчик Р. И., Харлимон С. А. Спектральный анализ резкий радикальноупорного шарикового подшипника, обусловленных дефектами колеи и шариков. «Изв. АН СССР. Механика твердого тела», 1971, № 1.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

К. М. ЕГИШЯН, Ю. Л. САРКИСЯН

СТЕРЖНЕВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

В работе излагается общий способ образования кинематических схем механизмов, воспроизводящих сложное движение объекта. Приводятся также основные схемы пространственных и плоских стержневых механизмов, осуществляющих криволинейно-поступательное движение объекта. Далее описываются некоторые современные приложения исследуемых механизмов. Рассматриваемые механизмы, управляющие перемещением объекта, коротко будут названы *перемещающими*.

§ 1. Структурный синтез перемещающих механизмов

Чтобы управлять посредством стержневых механизмов перемещением объекта (ведомого шатуна) в пространстве, необходимо найти такие точки или линии его, различные положения которых удовлетворяют условиям связи присоединенных к объекту звеньев и кинематических цепей. Звено, входящее в кинематические пары с объектом и стойкой, назовем *двухпарным звеном*.

Различные типы кинематических цепей и двухпарных звеньев накладывают разные условия связи на движение объекта. Ниже для простоты будут рассмотрены только такие механизмы, в которых каждое условие связи осуществляется посредством двухпарного звена.

Различным сочетанием низших кинематических пар, а именно: вращательных, поступательных, цилиндрических, сферических и сферических с пальцем и прорезью, соответствуют тринадцать видов двухпарных звеньев, схемы которых сведены в табл. 1. Все двухпарные звенья подразделены на четыре рода в зависимости от числа условий связи, налагаемыми ими. В табл. 1 приводятся аналитические выражения условий связи, представляющие собой уравнения определенных геометрических мест точек или прямых объекта в неподвижной системе координат. Ниже излагаются определения условий связи для рассматриваемых двухпарных звеньев.

Если звено с двумя сферическими парами удерживает точку B объекта на поверхности сферы с центром в неподвижной точке A , то звено с цилиндрической и сферической парами обеспечивает движение

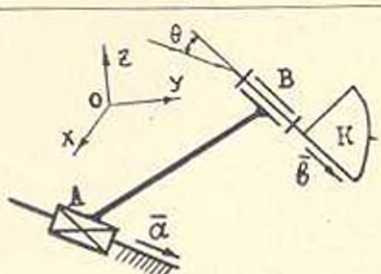
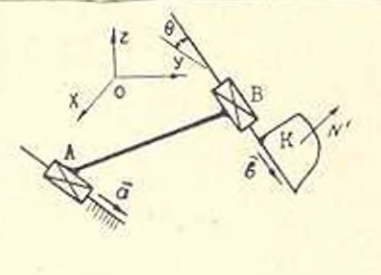
Таблица 1

Вид	Род	Условные обозначения	Выражения условий связи
1	2	3	4
1	I		1) $ \vec{r}_B - \vec{r}_A = l_{AB} = \text{const.} \quad (1)$
2	I		1) $\frac{ \vec{a} \cdot (\vec{G} - \vec{r}_A) }{ \vec{a} } = d = \text{const.} \quad (2)$ где d — расст. точки B от оси A; $\vec{a}$ — направл. вектор оси A.
3	I		1) см. (1); 2) $\vec{a} \cdot (\vec{r}_B - \vec{r}_A) = \text{const.} \quad (3)$
4	I		1) см. (1); 2) $\vec{n} \cdot \vec{N} = 0, \quad (4)$ где $\vec{n}$ и $\vec{N}$ — направл. векторы оси пальца и нормали к плоскости прирез.
5	II		1) см. (2); 2) см. (4).
6	II		1) $ \vec{r}_B - \vec{r}_M = l \cdot \vec{a}, \quad (5)$ 2) $ \vec{r}_B - \vec{r}_M = l \cdot \vec{a},$ где M — точка пересечения траектории точки B с плоскостью xOy; l — скалярная переменная величина.

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4
7	II		1) $\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{ \vec{a} \cdot \vec{b} } = \cos \theta = \text{const}; \quad (6)$ 2) $\frac{ (\vec{r}_B - \vec{r}_A) \cdot \vec{a} }{ \vec{a} \cdot \vec{b} } = d = \text{const}, \quad (7)$ где d — кратчайшее расстояние между осями A и B.
8			1) см. (5); 2) см. (5); 3) см. (4).
9	III		1) см. (6); 2) см. (7); 3) $(\vec{r}_B - \vec{r}_A) \times \vec{a} \cdot (\vec{a} \cdot \vec{b}) = \text{const}. \quad (8)$
10			1) см. (6); 2) см. (7); 3) $(\vec{r} \cdot \vec{r}_A)(\vec{a} \cdot \vec{b}) = 0, \quad (9)$ где $\vec{r}$ — радиус-вектор произвольной точки плоскости движения оси B.
II	IV		1) см. (6); 2) см. (7); 3) $(\vec{r}_B - \vec{r}_A) \cdot \vec{a} = \text{const}; \quad (10)$ 4) $(\vec{r}_B - \vec{r}_A) \cdot \vec{b} = \text{const}; \quad (11)$

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4
12	IV		1) см. (6); 2) см. (7); 3) } см. (5); 4) }
13			1) см. (6); 2) см. (7); 3) см. (9); 4) $\vec{N}' \cdot \vec{a} = \text{const}$, (12) где $\vec{N}'$ — нормаль к произвольной плоскости K объекта.

точки B объекта по поверхности цилиндра, ось которого совпадает с осью цилиндрической пары A .

Звено с вращательной и сферической парами обеспечивает движение точки B объекта по окружности, представляющей собой линию пересечения сферы радиуса AB и плоскости, проходящей через точку B и перпендикулярной оси вращательной пары A .

Все двухпарные звенья, содержащие сферическую пару с пальцем (см. виды 4, 5, 8), накладывают одно дополнительное условие связи, а именно: одна из прямых на объекте, проходящая через центр сферы (ось пальца), при движении должна оставаться в плоскости прореза.

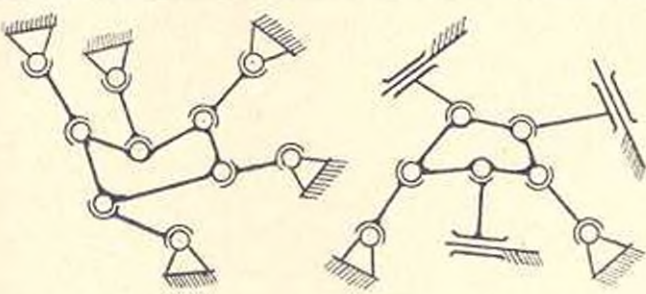
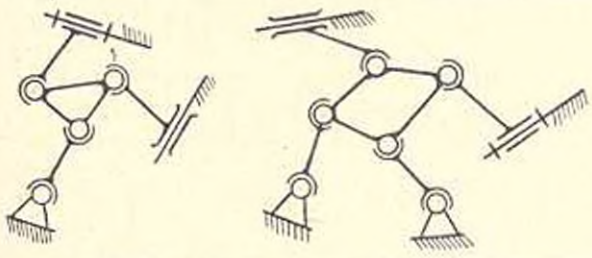
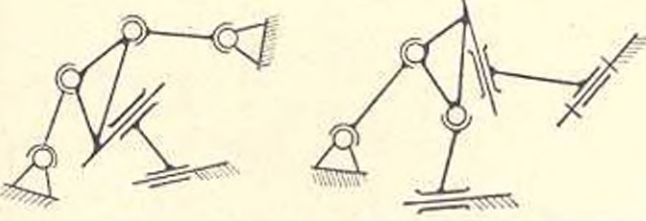
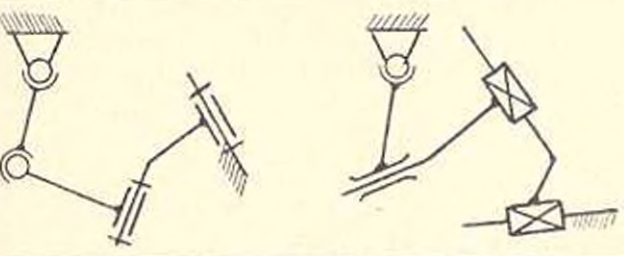
Звено с поступательной и сферической парами обуславливает движение точки B объекта по прямой, параллельной оси поступательной пары A .

Звено с двумя цилиндрическими парами обеспечивает постоянство угла и расстояния между осями кинематических пар A и B . Двухпарные звенья остальных пяти видов можно рассматривать как звено с двумя цилиндрическими парами, в которых дополнительно исключены те или другие движения объекта. Так, например, звено с цилиндрической и вращательной парами исключает движение вдоль неподвижной оси.

При звене с поступательной и цилиндрической парами исключена возможность поворота вокруг неподвижной оси. Следовательно, геометрическое место возможных положений оси цилиндрической пары B представляет собой плоскость, параллельную оси поступательной пары A .

Звено с двумя вращательными парами не допускает поступательные движения вдоль осей кинематических пар A и B , а звено с двумя поступательными парами — вращательные движения вокруг этих осей.

Таблица 2

Под- группа	Состав механизмов	Кинематические схемы перемещающих механизмов
I	$S_1=5$	
II	$S_1=1$ $S_2=2$ или $S_1=3$ $S_2=1$	
III	$S_1=2$ $S_3=1$	
IV	$S_3=1$ $S_4=1$	
V	$S_2=1$ $S_3=1$	

Наконец, при звене с поступательной и вращательной парами не представляется возможным вращательное движение относительно оси B объекта.

Следует отметить, что подобные выражения условий связи двухпарных звеньев и кинематических цепей получены Россом и Ченом [1]. Эти уравнения ими использованы для проектирования пространственных механизмов.

Непосредственная задача структурного синтеза перемещающих механизмов, очевидно, состоит в образовании их структурных схем путем присоединения к свободному объекту определенной совокупности двухпарных звеньев. Числа двухпарных звеньев, входящих в состав искомого однополвижного механизма, должны удовлетворять следующему равенству:

$$1 = 6 - 1S_1 - 2S_2 - 3S_3 - 4S_4 = 6 - \sum_{k=1}^4 kS_k, \quad (1)$$

где S_k — число двухпарных звеньев k -го рода.

Равенство (1) можно привести к виду

$$5 = S_1 + 2S_2 + 3S_3 + 4S_4 = \sum_{k=1}^4 kS_k. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что наибольшее число двухпарных звеньев в составе перемещающих механизмов равно пяти и соответствует одному случаю соединения двухпарных звеньев только первого рода. Максимальные числа двухпарных звеньев второго, третьего и четвертого родов равны: $S_{2\max} = 2$, $S_{3\max} = S_{4\max} = 1$.

Варьируя числами двухпарных звеньев, в соответствии с (2) можно получить все возможные схемы перемещающих механизмов. В зависимости от того, какие двухпарные звенья входят в состав перемещающих механизмов, последние разделены на пять подгрупп (табл. 2).

В первую подгруппу вошли механизмы с двухпарными звеньями только первого рода, при разных сочетаниях которых получаются шесть различных схем*. Во вторую подгруппу вошли 45 механизмов, образованные двухпарными звеньями первого и второго родов. Механизмы третьей подгруппы состоят из двухпарных звеньев первого и третьего родов (9 механизмов). В четвертую подгруппу вошли 15 механизмов, содержащие двухпарные звенья второго и третьего родов. Наконец, последняя подгруппа образована шестью механизмами со звеньями первого и четвертого родов.

На базе найденных кинематических схем путем наложения дополнительных геометрических условий можно получить стержневые механизмы, воспроизводящие плоскопараллельное или сферическое движение объекта. Например, присоединив к объекту два двухпарных звена четвертого рода со вращательными парами, оси которых параллельны, получаем плоский четырехшарнирный механизм, а при пересечении этих осей в одной точке — сферический четырехзвенник.

* В табл. 2 приведены по две схемы из каждой подгруппы.

§ 2. Образование структурных схем стержневых механизмов, воспроизводящих поступательное движение объекта

1. *Пространственное поступательное движение.* При решении ряда технических задач требуется параллельный перенос платформы через заданные позиции в пространстве или многократное воспроизведение

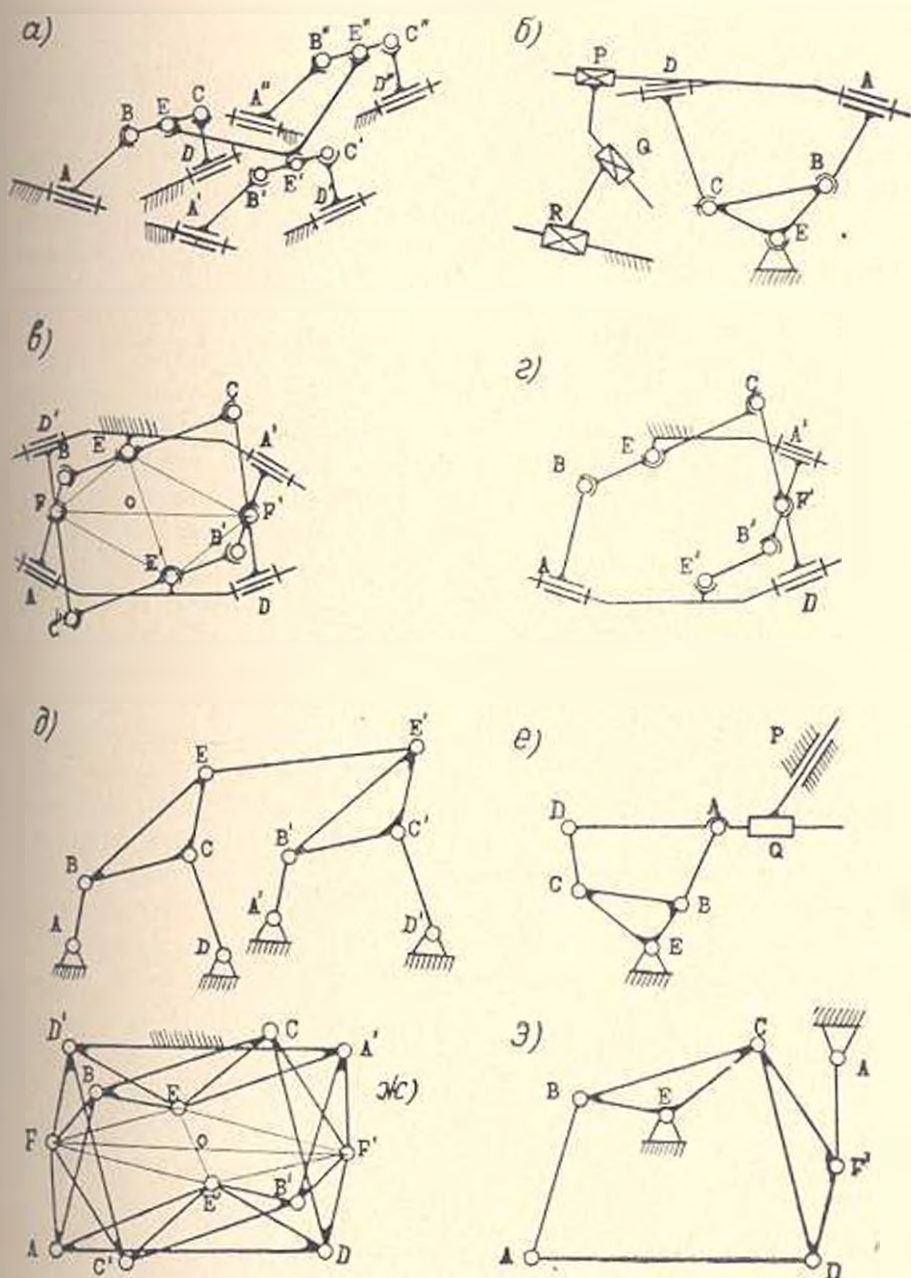


Рис. 1.

заданной кривой. В подобных случаях структурный синтез сводится к образованию кинематических схем механизмов, воспроизводящих поступательное движение шатуна. Для осуществления пространственного поступательного движения достаточно обеспечить перемещение любых трех точек его, не лежащих на одной прямой, по конгруэнтным траекториям. С этой целью управляемый объект посредством сферических пар E, E', E'' можно соединить с соответствующими точками шатунов трех одинаковых пространственных четырехзвенников $ABCD, A'B'C'D'$ и $A''B''C''D''$ (рис. 1, а). В результате получается одинаковый пространственный механизм.

Данную задачу можно решить и иным путем, а именно: к объекту присоединяется пространственный четырехзвенец $ABCD$, который обеспечивает требуемую траекторию поступательного движения, а поворот объекта вокруг неподвижных координатных осей исключается с помощью кинематической цепи PQR с поступательными парами (рис. 1, б).

Однако большое количество звеньев в первом механизме и наличие поступательных пар во втором ограничивают возможность их практического применения. Теорема, доказанная в работе [2], позволяет шарнирным соединением звеньев пространственного четырехзвенника $ABCD$ и его симметрии $A'B'C'D'$ получить одноподвижный восьмизвездный механизм с поступательным движением $AE'D$ (рис. 1, в). Так как механизм содержит пассивные условия связи, то без нарушения подвижности от механизма можно отсоединить любое из звеньев $B'C', A'B', C'D'$, получая таким образом семизвездные механизмы, в которых шатун $AE'D$ движется поступательно по шатуновой кривой точки E' четырехзвенника $A'B'C'D'$. Один из этих семизвездников показан на рис. 1, г.

2. *Плоское поступательное движение.* Для плоского поступательного движения объекта достаточно перемещать любые две точки его по плоским конгруэнтным кривым (рис. 1, д) или же исключить возможность поворота объекта относительно оси, перпендикулярной плоскости движения (рис. 1, е). В работе [3] доказывается аналог приведенной выше теоремы для случая плоского движения. Плоский восьмизвездник, соответствующий утверждению теоремы и полученный при произвольном расположении чертящей точки E на шатуне, изображен на рис. 1, ж. Как данный восьмизвездник, так и производные шестизвездные механизмы, образованные отсоединением двухзвездных неассуровых кинематических цепей $C'E'B'F'A', B'E'C'F'D', CF'DA'B'$ и $BAFD'C'$, обеспечивают поступательное движение звена $AE'D$ по траектории точки E' четырехзвенника $A'B'C'D'$. На рис. 1, з изображен один из указанных шестизвездников.

§ 3. Современные применения перемещающих механизмов

Первые примеры практического применения стержневых перемещающих механизмов относятся еще ко второй половине прошлого века.

Отметим, например, известную «стопоходную» машину Чебышева. Идея ее основывается на определенном подобии симметричной шатунной кривой лямдаобразного механизма Чебышева к траектории движения конца ноги животного относительно его корпуса. Однако интерес к стержневым направляющим механизмам по-настоящему

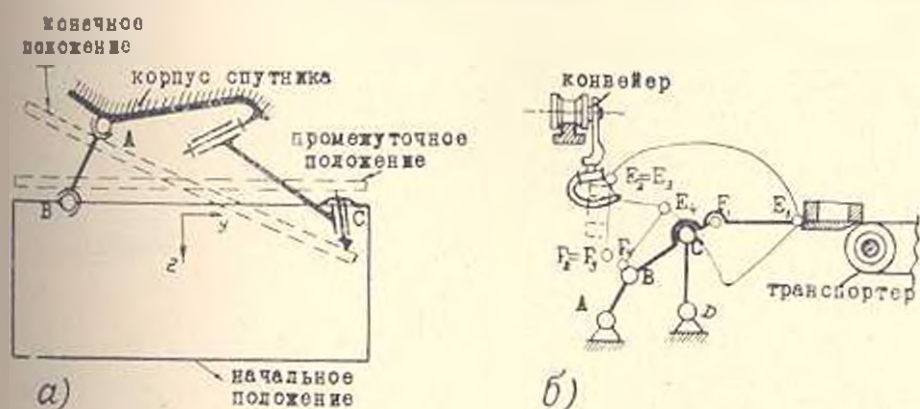


Рис. 2.

возрос в последние годы в связи с использованием их в космической технике, автомобильных подвесках, биомеханических устройствах, специальных станках, сельхозтехнике и т. д. Ниже описываются некоторые характерные применения стержневых перемещающих механизмов в различных областях современной техники. Сначала на примерах рассмотрим применение стержневых механизмов для воспроизведения сложного движения объекта.

Для установки солнечных панелей на орбитальных спутниках Уилсоном [4] синтезирован пространственный четырехзвенный механизм $ABCD$ (рис. 2, а), при помощи которого осуществляется движение плоской панели длиной 150 см и шириной 60 см, вначале лежащей в плоскости, определяемой уравнением $x=0$, в положение, определяемое поворотом на 90° вокруг оси y , а затем поворотом на $36^\circ 52'$ вокруг оси x .

В вспомогательных цехах прокатного производства для транспортировки катушек использован [5] плоский четырехзвенный механизм $ABCD$ (рис. 2, б). Плоскость шатуна EF проходит через заданные положения E_1F_1 , E_2F_2 , E_3F_3 . Катушки, подаваемые ленточным транспортером, поступают на горизонтальную плоскость шатуна (положение E_1F_1), затем приводятся в положение E_2F_2 и подвешиваются на крючок конвейера.

Еще большее распространение нашли шарнирные механизмы с поступательным движением шатуна. Во избежание больших ударных нагрузок и деформаций осей при передвижении по неровной местности представляется необходимым [6] поддрессирование колес прицепных тележек. С этой целью колеса соединяются с осью через промежуточные

шарнирные устройства (рис. 3, а), допускающие прямолинейное движение колес в плоскости, перпендикулярной направлению поступательного движения тележки.

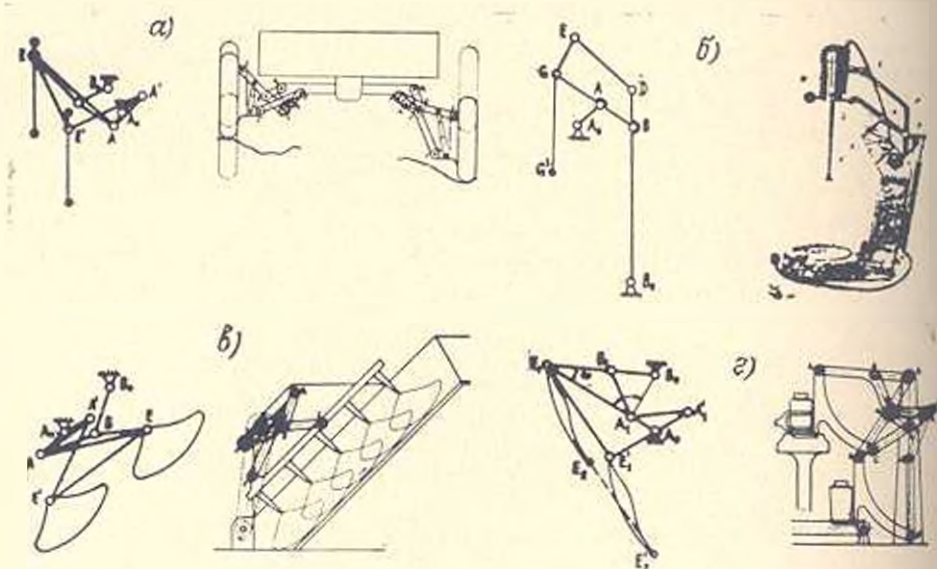


Рис. 3.

Для перемещения головки сверлильного станка (рис. 3, б) применен шестизвенный рычажный механизм, что значительно облегчает и удешевляет станок, так как позволяет отказаться от массивных литых направляющих (электромотор M прикреплен к точкам G и E прямолинейно движущегося ведомого звена направляющего механизма).

С помощью шестизвенного шарнирного механизма обеспечивается конгруэнтное криволинейное движение несущих зубцов наклонного транспортера (рис. 3, в). Требуемые размеры и форма траекторий выполняются соответствующим подбором соотношений между размерами базисного четырехзвенника A_0ABR_0E .

На рис. 3, г изображены кинематическая и полуконструктивная схемы транспортера резервуара жидкости. В данном случае поступательное движение съемника резервуара требуется для осуществления параллельного перемещения линии поверхности жидкости.

Կ. Մ. ԿՐԵՅԱՆ, ՅՈՒ. Լ. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ

ՈՐՏԵԿՆԻ ԲԱՐԻ ՀԱՐԺՈՒՄ ՎԵՐԱՐՏԱԴՐՈՂ ԼՅԱԿԱՅԻՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐ

Ա. Վ. Փ Ո Փ Ն Վ

Հոգիվածում առաջարկվում է տանող օդակի բարդ շարժում վերարտադրող ապրածուկան և հարթ լծակային մեխանիզմների կինեմատիկական սխեմաների կառուցման ընդհանուր մեթոդ: Բերվում են նաև շարժաթևի կորագիծ-համընթաց շարժում իրականացնող հոդակադային մեխանիզմների հիմնական սխեմաները: Վերջում նկարագրվում են այդ մեխանիզմների մի քանի ժամանակակից կիրառությունները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Чен П., Росс Б. Расчетные уравнения для синтеза кинематических цепей по раздельным и бесконечно близким положениям. «Конструирование и технология машиностроения», № 1, 1969.
2. Саркисян Ю. Л. О некоторых свойствах и преобразованиях пространственного «старежвенника». «Известия Арм. ССР (серия Т-III)», т. XXIII, № 3, 1970.
3. Саркисян Ю. Л. Некоторые новые теоремы и преобразования на основе свойства симметрии в шарнирных механизмах. Материалы VI совещания по основным проблемам теории машин и механизмов, 1970, Ленинград.
4. Уилсон. Аналитический кинематический синтез механизмов посредством конечных перемещений. «Конструирование и технологии машиностроения», № 2, 1965.
5. Kunad G., Goetze R., Hanster H. Getrieblechnische Beispiele aus dem Walzwerkshilfsmaschinenbau. «Maschinenbautechnik», № 10, 1968.
6. Hain K. Erzeugung von Parallel-Koppelbeugungen mit Anwendungen in der Landtechnik. «Grundlagen der Landtechnik», Heft 20, 1964.
7. Volmer J. Gelenkmehanismen als Ersatz für Stüttenführungen. «Maschinenbautechnik» 9, 1960, II. 6.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

К. Х. ШАХБАЗЯН, С. Б. ГАРАНЯН

СИНТЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЯТИЗВЕННОГО МЕХАНИЗМА ПО
 ИЗВЕСТНЫМ ДИСКРЕТНЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ ШАТУННОЙ ТОЧКИ

Необходимость решения многих важных задач проектирования исполнительных механизмов для систем ориентации, космической техники, машин-автоматов и т. д. обусловила быстрое развитие теории синтеза пространственных механизмов.

Авторами работ [1] - [6] созданы основные положения пространственной кинематической геометрии и решено несколько иллюстративных задач. В работе [7] приведен синтез (методом квадратического приближения) пространственного механизма для воспроизведения заданной пространственной кривой.

В настоящей статье предлагается способ интерполиционного синтеза пространственного пятизвенового механизма с четырьмя сферическими, одной сферической и одной вращательной парами по заданным дискретным положениям точки шатуна. В основе синтеза лежит обобщенное на пространственный случай основное расчетное уравнение работы [8]

Постановка задачи. Пусть в системе хуз дано n точек $M_i (M_{ix}, M_{iy}, M_{iz})$ $i=1, 2, \dots, n$. Требуется спроектировать пространственный пятизвеновый механизм (рис. 1), имеющий на шатуне точку, траектория которой проходит через заданные точки M_i .

В общем случае поставленную задачу можно решить для $n=7$ (см., например, [3]). Ниже мы ограничимся решением задачи для $n=5$. При этом задаемся плоскостью и центром вращения шарнирной точки H кривошипа OH .

$$H_x^2 + H_y^2 = b^2 \quad (1)$$

Обозначим длину отрезка $M_i H_i$ через d . Параметры b и d необходимо выбрать так, чтобы на окружности (1) можно было отыскивать точки $H_i (H_{ix}, H_{iy})$, соответствующие расстояния которых до заданных точек M_i были бы постоянной величиной, равной d , т. е.

$$H_i M_i = d = \text{const.} \quad (2)$$

Значения параметров b и d в зависимости от координат заданных точек M_i можно выбрать по условиям:

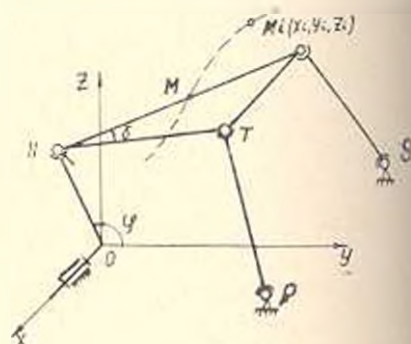


Рис. 1.

$$d \geq |M_{ix}|_{\max}; \quad 2(d + b) \geq a, \quad (3)$$

где a — наибольшая из величин $|M_{iy}|_{\max}$ и $|M_{iz}|_{\max}$.

Условия (3) являются необходимыми, но недостаточными для существования условия (2) и служат лишь для непосредственного выбора значений b и d . Далее эти значения проверяются по условию

$$(M_{ix}^2 + M_{iy}^2 + M_{iz}^2 - d^2 + b^2)^2 - 4b^2(M_{ix}^2 + M_{iy}^2) \leq 0, \quad (4)$$

которое является необходимым и достаточным для выполнения условия (2). После выбора b и d из системы

$$\begin{cases} M_{ix}^2 + (M_{iy} - H_{iy})^2 + (M_{iz} - H_{iz})^2 = d^2 \\ H_{iy}^2 + H_{iz}^2 = b^2 \end{cases} \quad (5)$$

определяем координаты точек H_i

$$H_{iy} = \frac{v_i + \sqrt{v_i^2 - m_i^2 \varphi_{ix}^2}}{2\varphi_{ix}}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_{ix}^2 &= M_{ix}^2 + M_{iz}^2; \\ v_i &= M_{iy}(\varphi_{ix}^2 + M_{ix}^2 - b^2 - d^2); \\ m_i &= (\varphi_{ix}^2 + M_{ix}^2 + b^2 - d^2)^2 - 4b^2 M_{ix}^2. \end{aligned}$$

Имея H_{iy} , по формуле

$$\cos \varphi_i = \frac{H_{iy}}{b} \quad (7)$$

определим углы наклона кривошипа. Из уравнения (1) определим величину H_{iz} . Направляющие косинусы прямых $H_i M_i$ определим по формулам:

$$\cos \alpha_i = \frac{M_{ix}}{d}; \quad \cos \beta_i = \frac{M_{iy} - H_{iy}}{d}; \quad \cos \gamma_i = \frac{M_{iz} - H_{iz}}{d}. \quad (8)$$

Принимая, что плоскость прорези кинематической пары H и ось пальца соответственно перпендикулярны кривошипу OH и прямой $H.M$, определим направляющие косинусы оси пальца:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_i &= \frac{\omega_i}{R_i}; \\ \cos \beta_i &= \frac{1}{R_i} \sin \varphi_i \cos \alpha_i; \\ \cos \gamma_i &= -\frac{1}{R_i} \cos \varphi_i \cos \alpha_i, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\omega_i = \cos \varphi_i \cos \alpha_{ii} - \sin \varphi_i \cos \beta_i;$$

$$R_i = \sqrt{\omega_i^2 + \cos^2 \alpha_{ii}}.$$

Шарнирные точки N и T шатуна определим соответственно на прямой HM и на прямой, лежащей на шатуниной плоскости (плоскость, образованная прямой HM и осью пальца) и образующей с прямой HM некоторый постоянный угол $\delta = \text{const}$. Направляющие косинусы этой прямой определятся из системы:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_i' \cos \alpha_i'' - \cos \beta_i' \cos \beta_i'' + \cos \gamma_i' \cos \gamma_i'' &= \sin \delta, \\ \cos \alpha_i' \cos \alpha_i + \cos \beta_i' \cos \beta_i + \cos \gamma_i' \cos \gamma_i &= \cos \delta, \\ (\cos \alpha_i')^2 + (\cos \beta_i')^2 + (\cos \gamma_i')^2 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Ниже мы определим только координаты точки N_i , т. к. определение координат точки T можно произвести совершенно аналогично.

$S(x, y, z)$ есть точка пересечения плоскостей симметрии отрезков между точками N_i . Уравнения этих плоскостей (их число на единицу меньше числа заданных прямых) можно представить в виде:

$$(N_{jx} - N_{ix})(2x - N_{jx} - N_{ix}) + (N_{jy} - N_{iy})(2y - N_{jy} - N_{iy}) + (N_{jz} - N_{iz})(2z - N_{jz} - N_{iz}) = 0, \quad (11)$$

$$(j=2, 3, 4, 5)$$

Координаты искомой точки N_i через неизвестную длину $l(l = H_i N_i)$ и координаты точки H_i выражаются соотношениями:

$$\begin{aligned} N_{ix} &= l \cos \alpha_i; \\ N_{iy} &= H_{iy} + l \cos \beta_i; \\ N_{iz} &= H_{iz} + l \cos \gamma_i. \end{aligned} \quad (12)$$

Отметим, что длина l может принимать также отрицательные значения, означающие, что искомые точки лежат на той стороне от точки H_i , которая соответствует отрицательному направлению прямой. Это объясняется тем, что если $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — углы наклона прямой $H_i M_i$ то $180^\circ - \alpha_i, 180^\circ - \beta_i, 180^\circ - \gamma_i$ — также углы наклона этой прямой.

С учетом (12) уравнения (11) после преобразований можно представить в виде:

$$l B_j x + (C_j + l D_j) y + (Q_j + l F_j) z + l E_j = 0, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} C_j &= H_{jy} - H_{iy}; \\ D_j &= H_{jz} - H_{iz}; \\ B_j &= \cos \alpha_j - \cos \alpha_i; \\ D_j &= \cos \beta_j - \cos \beta_i; \\ F_j &= \cos \gamma_j - \cos \gamma_i; \end{aligned}$$

$$E_j = H_{1j} \cos \beta_{1j} + H_{2j} \cos \beta_{2j} - (H_{3j} \cos \beta_{3j} + H_{4j} \cos \beta_{4j}),$$

$$(j=2, 3, 4, 5)$$

Для определения координат центра $S(x, y, z)$ сферической поверхности, на которой лежат точки N_i , уравнения (13) должны рассматриваться как одна система. Эта система имеет определенное решение, если

$$\Delta = \begin{vmatrix} B_2 & C_2 + ID_2 & Q_2 + IF_2 & E_2 \\ B_3 & C_3 + ID_3 & Q_3 + IF_3 & E_3 \\ B_4 & C_4 + ID_4 & Q_4 + IF_4 & E_4 \\ B_5 & C_5 + ID_5 & Q_5 + IF_5 & E_5 \end{vmatrix} = 0 \quad (14)$$

и $r=3$,

где Δ — определитель расширенной матрицы системы; r — ранг матрицы

$$\begin{vmatrix} B_2 & C_2 + ID_2 & Q_2 + IF_2 & E_2 \\ B_3 & C_3 + ID_3 & Q_3 + IF_3 & E_3 \\ B_4 & C_4 + ID_4 & Q_4 + IF_4 & E_4 \end{vmatrix}$$

Условие (14) приводится к уравнению

$$p_3 l^3 + q_3 l + k_3 = 0, \quad (15)$$

что всегда имеет место, если

$$q_3 \neq 4p_3 k_3 > 0,$$

где

$$p_3 = \begin{vmatrix} B_2 & D_2 & F_2 & E_2 \\ B_3 & D_3 & F_3 & E_3 \\ B_4 & D_4 & F_4 & E_4 \\ B_5 & D_5 & F_5 & E_5 \end{vmatrix}, \quad k_3 = \begin{vmatrix} B_2 & C_2 & Q_2 & E_2 \\ B_3 & C_3 & Q_3 & E_3 \\ B_4 & C_4 & Q_4 & E_4 \\ B_5 & C_5 & Q_5 & E_5 \end{vmatrix},$$

$$q_3 = \begin{vmatrix} B_2 & D_2 & Q_2 & E_2 \\ B_3 & D_3 & Q_3 & E_3 \\ B_4 & D_4 & Q_4 & E_4 \\ B_5 & D_5 & Q_5 & E_5 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} B_2 & C_2 & F_2 & E_2 \\ B_3 & C_3 & F_3 & E_3 \\ B_4 & C_4 & F_4 & E_4 \\ B_5 & C_5 & F_5 & E_5 \end{vmatrix}.$$

Подставляя корни уравнения (15) в любые три уравнения системы (13) и в уравнения (12) соответственно определим координаты x, y, z и N_{ix}, N_{iy}, N_{iz} точек S и N_i . Длина ведомого звена NS определится по формуле

$$NS = \sqrt{(x - N_x)^2 + (y - N_y)^2 + (z - N_z)^2}.$$

Пример. В системе координат xyz дано пять точек $M_1(0; 0,2; 0,4)$; $M_2(0,5; 0,5; 1)$; $M_3(0,3; 0,6; 0,6)$; $M_4(0,4; 1; 0,8)$; $M_5(-0,6; 1,1; 1,3)$.
3. ТН, № 3

Требуется определить размеры и расположение пятизвенного направляющего механизма (рис. 1), шатунная точка которой проходит через данные точки.

По условиям (2) и (3) выбрано $b = d = 1$. Для длин звеньев HN и HT и координат точек S , P и N , T (в первом положении) соответственно получены: $L_1 = -1.024939$; $L_2 = 1.578302$; $x_1 = 0.255864$; $y_1 = 1.005876$; $z_1 = 0.773898$; $x_2 = -0.148982$; $y_2 = 1.168704$; $z_2 = 1.116294$; $N_{1x} = 0$; $N_{1y} = -1.767795$; $N_{1z} = 0.877663$; $T_{1x} = 0.283131$; $T_{1y} = -1.046921$; $T_{1z} = -0.702678$. Длины ведомых звеньев NS и TP соответственно равны: $NS = 0.810398$; $TP = 0.919720$.

Ерл'У. Ерл'И

Поступило 29. IX. 1971.

Կ. Խ. ՇԱԽԲԱԶՅԱՆ, Ս. Բ. ԳԱՐԱՆՅԱՆ

ՏՈՐԱՌԱՊԱՆ ՀԵՓՈՂԱԿ ԴԵՖԷՆԵՑԻՐ ԻՆՏԵՆՏԸ ԸՈՏ ՇՈՐԱԿՈՒՅՈՒՄԻՆ ԿԵՏԻ ՇՈՒՏՆԵ ԳԻՍԿՐԵՏ ԳԻՐԳԵՐԻ

Ա. Վ. Փ. Ո. Փ. Ո. Փ.

Հոգիւթով շարադրված է ատրածական հնգոցակ մեխանիզմի սինթեզը ըստ շարժաթևային կետի նախապես հայտնի դիսկրետ դիրքերի: Տույց է տրված, որ խնդիրը ընդհանուր դեպքում լուծելի է չափ դիրքի համար: Հինգ դիրքի համար ստացված է համադրում, որը սինթեզման շարադրված եղանակի դեպքում հանդիս է դալիս սրպես իմնական հաշվարկային հաջողություն:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Уилсон. Аналитический кинематический синтез механизмов посредством конечных перемещений. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия В, № 2, 1965.
2. Росс Б. Кинематика движения через конечно удаленные положения. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия Е, № 1, 1967.
3. Росс Б. Теория конечных перемещений и применении к синтезу механизмов. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия Е, № 4, 1967.
4. Су. Проектирование пространственных механизмов для управления перемещением твердого тела. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия В, № 3, 1968.
5. Чен П., Росс Б. Расчетные уравнения для синтеза кинематических цепей по отдельным и бесконечно близким положениям. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия В, № 1, 1969.
6. Чен П., Росс Б. Общая теория кинематического синтеза по отдельным и бесконечно близким положениям. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия В, № 1, 1969.
7. Тулл, Льюис. Пространственный кинематический синтез. Тр. американского общества инженеров-механиков, серия В, № 3, 1968.
8. Гарания С., Шахбазян К. Применение преобразования Роберта-Чебышева при синтезе шарнирного четырехзвенника. «Известия АН Арм. ССР. Механика», № 2, 1971.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Т. А. ГОРОЯН, Э. Е. ХАЧИЯН

О СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ КАРКАСНЫХ
ЗДАНИЙ С УБЫВАЮЩИМИ ПО ВЫСОТЕ ПОЭТАЖНЫМИ
ЖЕСТКОСТЯМИ

Анализируя частотные уравнения многоэтажных каркасных зданий с абсолютно жесткими ригелями при равенстве масс (m), сосредоточенных в уровнях перекрытий, и жесткостей этажей (a), нами в [1] была обнаружена линейная зависимость периодов свободных колебаний от этажности (n) и для определения периодов трех низших тонов свободных колебаний зданий высотой до 20 этажей предложена формула:

$$T_r = 2\pi (A_r + nB_r) \sqrt{m/a}, \quad (1)$$

где A_r и B_r — безразмерные коэффициенты, зависящие от тона колебаний (r), и соответственно имеют значения: для I тона — 0,367 и 0,633; для II тона — 0,160 и 0,210; для III тона — 0,118 и 0,126.

В продолжение этих исследований в настоящей статье рассматриваются свободные колебания многоэтажных каркасных зданий с убывающими снизу вверх поэтажными жесткостями. Принимая линейный закон убывания поэтажных жесткостей, в формулу (1) введен корректив и она представлена в более общем виде.

Для оценки общего напряженного состояния таких зданий при сейсмических воздействиях, с использованием акселерограмм сильных землетрясений и ЭВМ проанализированы упругие реакции (response) конкретных 10-этажных зданий.

1. Периоды и формы свободных колебаний. Убывание жесткости этажа по высоте здания — это следствие стремления полнее использовать несущие способности сечений стоек каркаса пропорционально убыванию внутренних усилий. Закономерность изменения сечений стоек, следовательно, и поэтажных жесткостей зависит от ряда конструктивных и производственных факторов. Дать общую математическую формулировку этой закономерности, отвечающую всему разнообразию изменения поэтажной жесткости, невозможно. Поэтому, с целью упрощения, в первом приближении принимаем линейный закон убывания поэтажных жесткостей по высоте здания. При этом, если жесткость первого этажа — a_1 , и последнего — $a_n = \bar{\alpha} a_1$ (где $\bar{\alpha} < 1$), то жесткость k -го этажа (сила, вызывающая единичное горизонтальное смещение этажа) будет:

$$a_k = f_k a_1, \quad (2)$$

где

$$f_k = \bar{\alpha} + \frac{n-k}{n-1} (1-\bar{\alpha}), \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

При абсолютно жестких ригелях динамическая расчетная схема здания представится в виде невесомого ступенчатого консольного бруса, несущего n масс, сосредоточенных в уровнях перекрытий (рис. 1). Дифференциальные уравнения движения масс имеют вид:

$$m_k \ddot{y}_k + a_k(y_k - y_{k-1}) - a_{k-1}(y_{k+1} - y_k) = 0, \quad (4)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

Частным интегралом системы (4) является

$$y_k = C_k \sin pt,$$

и для определения неизвестных амплитуд C_k получается система однородных алгебраических уравнений:

$$-m_k p^2 C_k + a_k(C_k - C_{k-1}) - a_{k-1}(C_{k+1} - C_k) = 0, \quad (5)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

где p — круговая частота свободных колебаний.

При равенстве поэтажно сосредоточенных масс* ($m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$) и учете зависимости (2) характеристический определитель матрицы системы (5) запишется в виде:

$$\Delta_n(\lambda) = \begin{vmatrix} f_1 + f_2 - \lambda & -f_2 & 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ -f_2 & f_2 + f_3 - \lambda & -f_3 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & -f_3 & f_3 + f_4 - \lambda & -f_4 & 0 \dots 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \dots \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \dots \cdot \\ 0 & 0 \dots 0 & -f_{n-1} & f_{n-1} + f_n - \lambda & -f_n \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & -f_n & f_n - \lambda \end{vmatrix} \quad (6)$$

где $\lambda = mp^2/a_1$ — безразмерная частота свободных колебаний. Очевидно, что частотное уравнение соответствует условию: $\Delta_n(\lambda) = 0$.

Для сокращенной записи матрицы (6) ее ненулевые элементы обозначим:

$$\left. \begin{aligned} d_{11} &= f_1 + f_2 - \lambda; & d_{12} &= -f_2; \\ d_{k, k-1} &= -f_k \\ d_{kk} &= f_k + f_{k+1} - \lambda; \\ d_{k, k+1} &= -f_{k+1} \end{aligned} \right\} \text{ при } k = 2, 3, \dots, n-1;$$

$$d_{n, n-1} = -f_n; \quad d_{nn} = f_n - \lambda.$$

* Влияние убывания поэтажной жесткости на вес этажа ничтожно и им следует пренебречь.

Раскрывая характеристический определитель матрицы $[d_{kj}]_{n,n}$ по последнему столбцу, получим частотное уравнение в следующем виде:

$$\prod_{i=0}^{n-1} D_i = 0, \quad (7)$$

где

$$D_i = D_{i+1} d_{i+1,i+1} - D_{i-1} d_{i-1,i+2} d_{i+2,i+1} \quad (8)$$

($i=0, 1, 2, \dots, n-1$), причем $D_n=1$ и $D_{n-1}=0$.

Используя (3) и (8), для зданий высотой до 20 этажей на ЭВМ с точностью в 10^{-5} вычислены величины первых трех низших корней частотного уравнения (7) при $\alpha=1; 1/2; 1/4; 1/8$.

Для оценки влияния убывания поэтажных жесткостей по высоте здания на периоды его свободных колебаний рассмотрим отношение

$$\gamma_r = T_r / T_r^* \quad (9)$$

где T_r — период r -го тона свободных колебаний при убывании поэтажных жесткостей по высоте здания;

T_r^* — то же, когда жесткости всех этажей равны жесткости первого этажа.

Через корни частотных уравнений выражение (9) запишется в виде:

$$\gamma_r = \sqrt{\lambda_r^* / \lambda_r} \quad (10)$$

где λ_r^* — корни частотного уравнения при равенстве жесткостей всех этажей ($\alpha=1$).

По полученным значениям корней λ_r вычислены величины γ_r . Результаты вычислений показали, что величины γ_r , будучи зависимыми от тона колебаний, при фиксированных значениях α не зависят от этажности здания; имеющиеся небольшие расхождения в значениях γ_r (не более $\pm 1\%$) следует приписать точности вычислений.

В рассмотренном диапазоне изменения параметра α зависимость $\gamma_r(\alpha)$ довольно хорошо аппроксимируется функцией

$$\gamma_r = 1 - \chi_r \lg \alpha, \quad (11)$$

где χ_r — коэффициент, зависящий от тона колебаний. Для первых трех низших тонов значения χ_r следующие: $\chi_1=0,292$; $\chi_2=0,588$; $\chi_3=0,648$. При этом, расхождение между значениями γ_r , вычисленными по формулам (10) и (11), не превышает 3% .

Полученная зависимость (11) позволяет внести в формулу (1) корректив, учитывающий влияние убывания поэтажных жесткостей по высоте здания на периоды его свободных колебаний. Таким образом, при линейном законе убывания поэтажных жесткостей по высоте здания для определения периодов первых трех тонов свободных колебаний зданий высотой до 20 этажей получаем формулу:

$$T_r = 2\pi(1 - \chi_r \lg \alpha)(A_r + nB_r) \sqrt{\frac{m}{a_2}}, \quad (12)$$

где α_1 — жесткость первого этажа; остальные обозначения те же, что и в выражениях (1) и (11). [Заметим, что формула (12) переходит в (1) при $\alpha = 1$.]

Для выявления влияния убывания поэтажных жесткостей по высоте здания на формы его свободных колебаний, рассмотрим систему алгебраических уравнений (5) относительно неизвестных амплитуд C_k при равенстве поэтажных масс и изменении жесткостей этажей по (2). Поскольку при нетривиальном решении системы (5) одно из ее уравнений является линейной комбинацией остальных, то, отбрасывая его (в данном случае — первое) и принимая $C_n = 1$, решаем оставшуюся систему $n-1$ уравнений. При рассмотренных значениях параметра α и соответствующих им корнях уравнения (7) решение этой системы произведено на ЭВМ. По найденным значениям C_k вычислены коэффициенты γ_k первых трех форм колебаний для зданий высотой до 20 этажей*.

Анализ результатов вычислений показывает, что при одной и той же этажности формы колебаний в сильной степени зависят от значения параметра α . На рис. 2 приведены формы колебаний систем с 10-ю

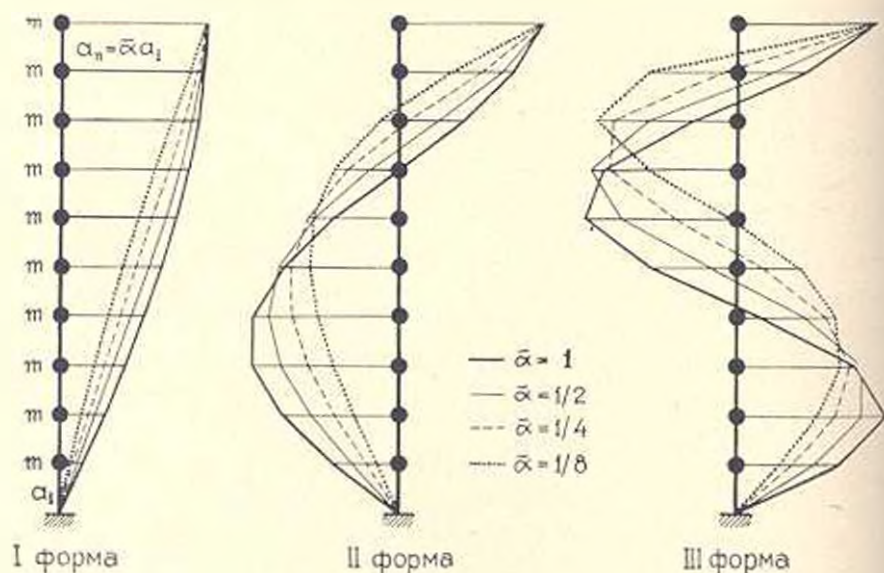


Рис. 2 Формы колебаний 10-этажного здания при различных значениях α

степенями свободы, и, как видно, убывание поэтажных жесткостей сильнее сказывается на формах колебаний высших тонов; с уменьшением α пучности высших форм смещаются вверх по высоте здания. Однако, обоснованный анализ влияния высших форм колебаний на общее напряженное состояние здания при сейсмических воздействиях

* Результаты вычислений здесь не приводятся ввиду недостатка места.

можно произвести только при заданном законе движения основания, так как и зависимости от спектрального состава колебаний грунта влияние отдельных форм будет различным. Для конкретных 10-этажных зданий ниже произведен такой анализ с использованием реальных акселерограмм землетрясений.

2. Анализ напряженного состояния зданий с убывающими по высоте поэтажными жесткостями. Беря за основу параметры реального 10-этажного железобетонного каркасного здания с жесткостями этажей, постоянными по его высоте ($\alpha=1$), и варьируя значениями параметра α , рассмотрены 3 варианта предполагаемых зданий с $\alpha=1/2; 1/4; 1/8$ при линейном законе убывания поэтажных жесткостей. При этом жесткость первого этажа остается неизменной — равной жесткости исходного (эталонного) здания.

Каркас исходного здания состоит из 10 поперечных двухпролетных рам с параметрами: пролеты $L_1=L_2=6,0$ м; высота ярусов $l_1=l_2=\dots=l_{10}=3,3$ м; размеры поперечного сечения всех стоек — 40×50 см; бетон марки 200 ($E=265000$ кг/см²). Веса масс, сосредоточенных на уровнях перекрытий, следующие: $G_1=G_2=\dots=G_9=540$ т; $G_{10}=615$ т. Периоды первых трех тонов свободных колебаний рассматриваемых зданий в их поперечном направлении, вычисленные по формуле (12), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тон колебаний	Периоды сек при значениях α			
	1	1/2	1/4	1/8
I	0,910	0,997	1,074	1,139
II	0,307	0,362	0,419	0,482
III	0,187	0,221	0,260	0,305

С использованием акселерограмм четырех калифорнийских землетрясений** интенсивностью в 7—8 баллов по методике, приведенной в [4], на ЭВМ вычислены максимальные значения упругих реакций рассматриваемых зданий (в их поперечном направлении) с учетом наложения первых трех форм колебаний. При этом для всех форм колебаний величина коэффициента внутреннего трения предположительно принята $\gamma=0,12$. На рис. 3 приведены эиоры максимальных значений

** В [2] показано, что при $n>5$ влиянием неравенства поэтажных масс в пределах 25—30% можно пренебречь и периоды и формы колебаний определять как для систем с равными массами на всех этажах, принимая за величину поэтажной массы среднее арифметическое всех масс системы.

** Имено: 1. Ferndale Г—60 (3.X.1941); 2. Hollister Г—21 (9.III.1949); 3. Eureka Г—10 (21.XII.1956); 4. Taft Г—70 (12.I.1954) [3].

перерезывающих сил на все здание по трем и отдельным формам колебаний при акселерограмме № 1.

Анализ реакций показывает, что убывание поэтажных жесткостей приводит к уменьшению перерезывающих сил и выравниванию их значений по высоте здания. (То же имеет место и для максимумов изгибающих моментов в стойках каркаса, так как при абсолютно

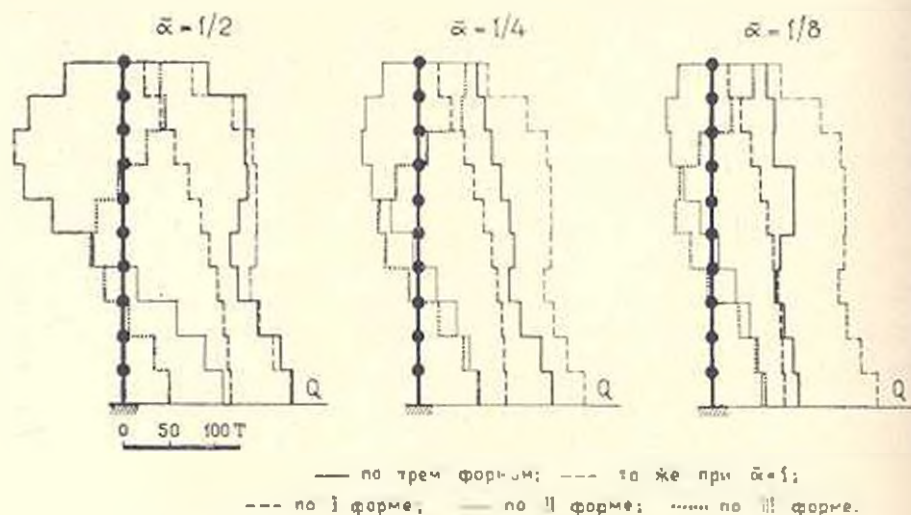


Рис. 3. Эпюры перерезывающих сил по акселерограмме № 1.

жестких ригелях их значения отличаются от перерезывающих сил постоянным множителем.) Эта тенденция тем сильнее, чем меньше величина параметра $\bar{\alpha}$. Однако, уменьшение абсолютных значений перерезывающих сил (изгибающих моментов) в данном случае не может послужить критерием при оценке сейсмостойкости здания, так как убывание поэтажных жесткостей связано с уменьшением размеров поперечных сечений несущих элементов каркаса — стоек, в то время, как величины продольных сил практически остаются без изменения. Поэтому при анализе реакций правильнее будет оперировать не перерезывающими силами (изгибающими моментами), а напряжениями, возникающими в элементах каркаса.

Для определения напряжений в элементах железобетонного каркаса заранее должны быть известны параметры их сечений. Поскольку цель настоящего анализа — не определение истинных величин напряжений в бетоне и в арматуре, а сопоставление напряженных состояний здания по высоте при различных значениях параметра $\bar{\alpha}$, то, для упрощения задачи, можно пойти на определенное допущение — уподобить железобетон однородному материалу и для определения напряжений пользоваться формулами сопротивления материалов. Конечно, это упрощение вносит определенную погрешность, но, поскольку оно делается для сравнительной оценки напряженных состояний, то,

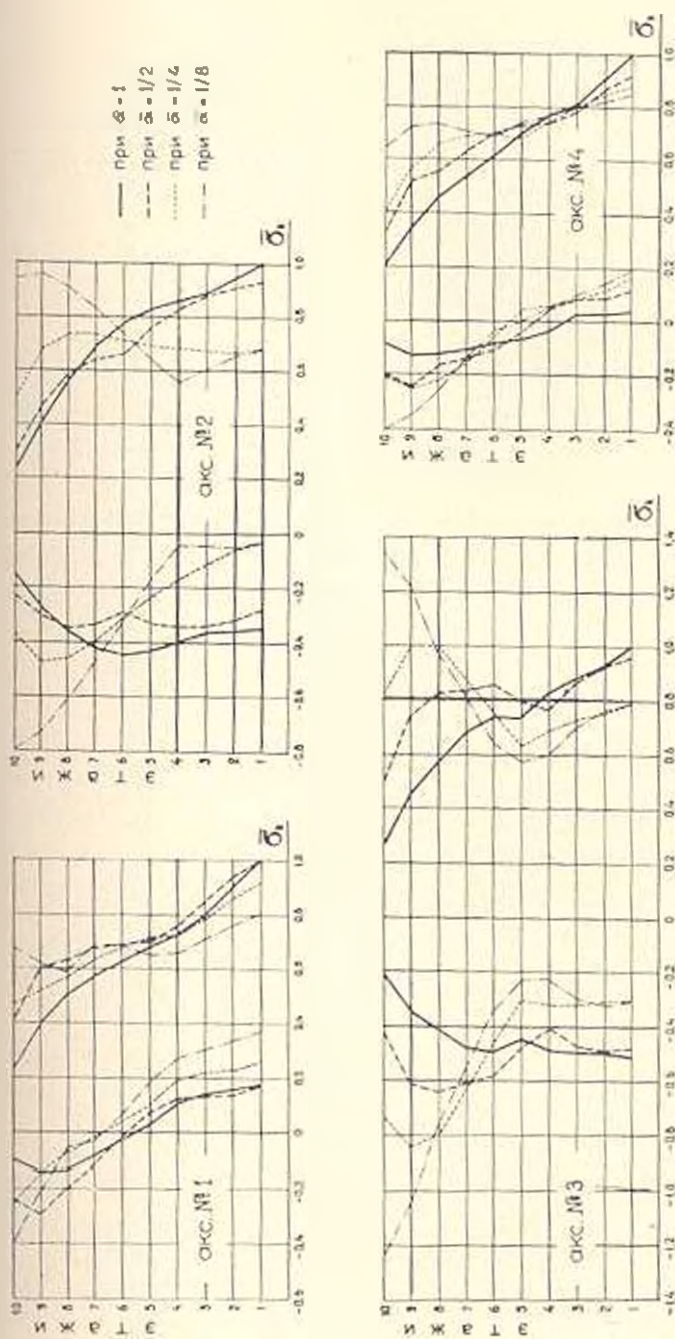


Рис. 4. Графики изменения относительных нормальных напряжений по высоте здания при акселерограммах №№ 1-4 (знак плюс соответствует сжатию)

по нашему мнению, относительное влияние этой погрешности на результаты анализа будет незначительным.

Жесткость k -го этажа пропорциональна сумме моментов инерции стоек соответственного этажа, поэтому, принимая ширину стоек всех этажей постоянной и используя (21), будем иметь:

$$F_k = F_1 f'_k \quad \text{и} \quad W_k = W_1 f''_k, \quad (13)$$

где F_1 и W_1 — соответственно площадь и момент сопротивления сечения стойки первого этажа.

При сейсмическом воздействии стойки работают на внецентренное сжатие. Используя выражения (13) и результаты машинных вычислений, определены экстремальные значения напряжений в сечениях стоек всех этажей при рассмотренных значениях α .

Для сопоставления напряженных состояний зданий удобнее оперировать не абсолютными значениями напряжений (σ_k), а относительными ($\bar{\sigma}_k$), выраженными через максимальное сжимающее напряжение σ_{1max} , возникающее в стойках первого этажа здания с равными жесткостями всех этажей ($\alpha = 1$). С этой целью для каждой акселерограммы вычислены значения $\bar{\sigma}_k = \sigma_k / \sigma_{1max}$. По результатам вычислений построены графики изменения $\bar{\sigma}_k$ по высоте здания, приведенные на рис. 4. Отметим, что на этих графиках действительны только те значения $\bar{\sigma}_k$, которые соответствуют уровням этажей (промежуточные значения лишены смысла).

Как видно из рис. 4, с уменьшением параметра α усиливается напряженное состояние здания — в особенности его верхней трети, где относительные значения как максимальных, так и минимальных нормальных напряжений достигают величин, больших, чем при равенстве поэтажных жесткостей. Аналогичная картина имеет место и для скалывающих напряжений. Очевидно, что совместное действие нормальных и скалывающих напряжений приведет к еще большему усилению напряженности верхних этажей. Это может создать опасность разрушения последних.

Таким образом, результаты проведенного анализа показывают, что уменьшение поэтажной жесткости по высоте здания приводит к значительному изменению картины его напряженного состояния и к резкому усилению напряженности верхних этажей при сейсмических воздействиях. Целесообразность возведения таких зданий будет обусловлена комплексом экономических и конструктивных соображений, и, по-видимому, в отдельных случаях оно окажется выгодным при некотором конструктивном усилении стоек верхних этажей.

Տ.Ա. ԿՈՐՅԱՆ, Է. Ե. ԽԱՉԱՆ

ՔԱՅՐԱՀԱՐԿ ԿԱՐԿԱՍԱՅԻՆ ՇԵՆՔԵՐԻ ՈՆՅՈՄԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ ԵՐԻ ՀԱՐԿԵՐԻ ԿՈՇՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՆՎԱԶՈՒՄ ԵՆ ԸՍՏ ՇԵՆՔԻ ԲԱՐՁՐՈՒԹՅԱՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Վերլուծության ենթարկելով բաղաձայն կարկասային շենքերի հաճախականությունների հավասարումները՝ երբ հարկերի կաշտայուններն ըստ շենքի բարձրության նվազում են դժային օրենքով, հողվածում առաջարկված է բանաձև, որը հնարավորություն է ընձեռնում որոշել մինչև 20 հարկ բարձրություն ունեցող շենքերի ազատ տատանումների պարբերությունները՝ Կիսված են նաև տատանումների ձևերը:

Այդպիսի շենքերի սկսմակայունությունը դեհատելու նպատակով կատարված է երկաթբետոնե 10-հարկանի կարկասային շենքերի առաձգական ափսոսանքային համադրում՝ 7—8 բալլ ուժգնության չորս երկրաշարժերի ակսելերոգրամների և էձՄ-ի օգտագործմամբ՝ տատանումների առաջին երեք ձևերի հաշվառումով: Համադրումը ցույց է տվել, որ հարկերի կաշտայուն նվազումը բերում է վերին հարկերի լարվածային փրճակի ուժեղացման սեյսմիկ ազդեցությունների դեպքում:

Լ Ի Ն Ե Ր Ա Տ Ր Ա Մ Ա

1. Гороян Т. А., Хачиян Э. П. К изучению сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий повышенной этажности. Доклады Всесоюзного совещания по сейсмостойкому строительству в Алма-Ате. Фрунзе, 1967.
2. Гороян Т. А. О влиянии неравенства поэтажных масс на периоды и формы свободных колебаний многоэтажных зданий. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II.)», т. XXII, № 1, 1969.
3. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Госстройиздат, 1962.
4. Гороян Т. А., Хачиян Э. П. Анализ реакций многоэтажных каркасных зданий на сейсмические воздействия по акселерограммам сильных землетрясений. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II.)», т. XXIV, № 4, 1971.

ГИДРАВЛИКА

А. М. ГАСПАРЯН, Э. А. МЕЛИКЯН

О ПРОДОЛЬНОМ СМЕЩЕНИИ ЖИДКОСТИ

Настоящее исследование касается влияния гидродинамической обстановки на интенсивность массообмена в двухфазном потоке, состоящем из жидкости и взвешенных частиц.

Известно, что для стационарного процесса массообмена

$$G = \alpha F \Delta x = \alpha W_k f \Delta x, \quad (1)$$

где G — вес вещества, перешедшего из одной фазы в другую за единицу времени; α — средний коэффициент массопередачи; $F = W_k f$ — поверхность контакта между фазами в аппарате, имеющем объем W_k ; f — среднее значение поверхности контакта в единице объема; $\Delta x = x_s - x$ — разность концентраций растворенного вещества (движущая сила).

Ранее было показано [1, 2], что путем изменения направления потока и формы аппарата можно в широких пределах изменить объемную концентрацию твердой фазы (φ), следовательно, и поверхность контакта (f) в аппарате. Известно, что

$$f = 6\varphi/\sigma, \quad (2)$$

где σ — диаметр сферических частиц. Также известно [3], что с ростом φ (или f) уменьшается скорость стесненного падения частиц, определяемая выражением

$$C = KC_0(1 - \varphi)^n, \quad (3)$$

и, следовательно, уменьшается скорость омывания (относительная скорость) частиц жидкостью:

$$C' = KC'_0(1 - \varphi)^{n-1}. \quad (4)$$

Для иллюстрации приведем следующее: в области ламинарного режима показатель степени n составляет 4.72. При значениях φ 0,05 и 0,50 скорость омывания C' соответственно будет $0,83KC'_0$ и $0,076KC'_0$. Иначе говоря, при увеличении φ (или f) в 10 раз, скорость омывания частиц жидкой фазой уменьшится в $0,83:0,076 = 11$ раз. На первый взгляд кажется, что уменьшение скорости C' должно отрицательно влиять на коэффициент массопередачи α , и, следовательно, увеличение φ при помощи соответствующих изменений гидроди-

важической обстановки должно иметь двойное влияние на процесс массообмена: ускоряющее (иследствии роста f) и замедляющее (по причине уменьшения C'). Отсюда возникает одна из задач наших исследований — определение влияния C' (или концентрации φ) на коэффициент α . Отметим, что влияние C' на α , как это показали наши теоретические и экспериментальные исследования, небольшое и во многих случаях им можно пренебречь.

На интенсивность процесса также влияет степень продольного смещения жидкой фазы; смещение, которое приводит к уменьшению движущей силы Δx . Нужно полагать, что концентрация φ является одним из важных факторов, влияющих на это. Выявление этой роли φ явилось второй задачей наших исследований.

Настоящая статья посвящена только определению коэффициента продольного смещения и его связи с движущей силой Δx .

Коэффициент продольного смещения. Еще в 1944 году А. Н. Плановский [1] (а позже А. Н. Плановский и Д. А. Гуревич [2]) подробно рассмотрели явление продольного смещения чистых жидкостей (в отсутствии извесей) и дал определения *аппарата идеального смешения* (АИС) и *аппарата идеального вытеснения* (АИВ). Здесь, в несколько ином изложении, соответствующем нашим целям, остановимся на этих определениях.

Пусть аппарат 1 (рис. 1), емкостью V , заполнен жидкостью „А“. По 2 начинается подача в аппарат жидкости „В“, во всех соотношениях растворимой и „А“. Она подается с постоянной объемной скоростью W . Пусть „В“, войдя в аппарат, мгновенно и равномерно распределяется по всему объему V , и выходящая через 3 жидкость имеет такой же состав, какой имеется в аппарате в данный момент.

Пусть в данное мгновение концентрация „В“ в аппарате равна x . Через промежуток времени dt она станет $(x + dx)$, а содержание „В“ в аппарате станет $V(x + dx)$. За время dt в аппарат поступило $W dt$ и ушло $W(x + dx)dt$ жидкости „В“. Поэтому

$$V(x + dx) = Vx + Wdt - W(x + dx)dt.$$

Отсюда

$$\frac{W}{V} = -\ln(1 - x). \quad (5)$$

Здесь мы рассмотрели аппарат идеального смешения (АИС).

В аппарате идеального вытеснения (АИВ) жидкость «В» вытесняет «А» как поршень, не смешиваясь. Жидкость «В» появляется в 3 только после полного удаления «А» из аппарата, т. е. когда $Wt/V = 1$.

На рис. 2 кривая 1 выражает $x = f\left(\frac{Wt}{V}\right)$ для аппарата идеального смешения (АИС), согласно (5). Прямые 2—3—4 дают эту же связь для аппарата идеального вытеснения (АИВ). Кривая 5, занимающая промежуточное положение, представляет изменение x для какого-либо реального аппарата.

Если в аппарат рис. 1 подана жидкость «В» объемом V , т. е. $W\tau/V=1$, то:

а. При АИС концентрация «В» в аппарате и на выходе из него будет

$$-\ln(1-x) = \frac{W\tau}{V} = 1 \quad \text{и} \quad x = 0,633.$$

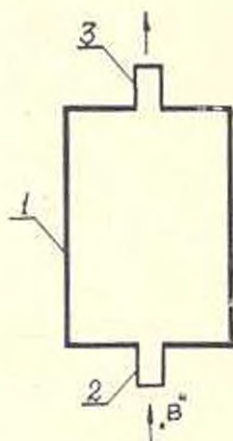


Рис. 1

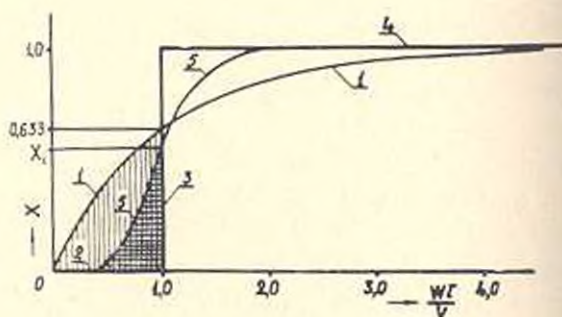


Рис. 2

Это означает, что в аппарате в рассматриваемый момент имеется жидкость «В» в объеме $0,633V$. Но, так как в аппарат подано этой жидкости в объеме V , то ушедшее из аппарата количество «В» составит $0,367V$. На рис. 2 этот объем «В» выражается вертикально заштрихованной областью. Средняя концентрация ушедшей из аппарата жидкости «В» составит $x_c = 0,367$.

б. При АИВ, когда $W\tau/V=1$, аппарат целиком заполнен жидкостью «В», а на выходе ее концентрация $x_0 = 0$.

в. В реальном аппарате, когда $W\tau/V=1$, концентрация «В» в различных частях аппарата будет разная, а на выходе составит некоторую x_1 . Изменение концентрации «В» на выходе пойдет по некоторой кривой 5, а объем ушедшего из аппарата компонента «В» определится площадью перекрестно заштрихованной области. Средняя концентрация x жидкости «В» в ушедшей смеси будет пропорциональна площади этой области.

г. Соотношения средних концентраций x и x_c ушедшей из аппарата жидкости (при $W\tau/V=1$), или соотношение площадей перекрестно заштрихованных областей, может служить мерилем степени близости данного реального аппарата к АИС. Обозначим это соотношение через γ и назовем его коэффициентом продольного смешения:

$$\gamma = \frac{x}{x_c} = \frac{x}{0,367} = 2,72x. \quad (6)$$

При идеальном смещении $\beta = 1$. При идеальном вытеснении $\beta = 0$. В реальном аппарате β имеет промежуточное значение между 0 и 1.

Зависимость движущей силы Δx от β . Пусть в аппарате рис. 1 имеет место растворение некоторой соли, частицы которой равномерной взвесью заполняют весь аппарат и их убывает непрерывно компенсируется вводом новых частиц. Концентрация частиц φ , их удельная поверхность f , скорость подачи растворителя W , начальная (x_1) и конечная (x_2) концентрации соли в растворителе постоянны во времени.

Допустим сначала, что процесс идет по режиму идеального вытеснения, т. е. $\beta = 0$, высота аппарата равна h_1 , а изменение концентрации соли по h_1 идет по кривой 1 (рис. 3). Очевидно, средняя движущая сила Δx_n будет:

$$\Delta x_n = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2 - x_1}{x_s - x_1}} = (x_s - x_2) \cdot \frac{\text{плос.}(x_1 - x_2 - \beta - x_1)}{h_1} \quad (7)$$

Числитель второй слагаемой в (7) представляет собой заштрихованную площадь выше кривой 1 (назовем ее площадью I).

Теперь допустим, что аппарат переходит на режим идеального смещения, когда $\beta = 1$. Тогда, при тех же условиях и при постоянстве производительности, потребуется другая высота аппарата

$$h_2 = \frac{\Delta x_n h_1}{\Delta x_s} \quad (8)$$

где Δx_s — средняя движущая сила при АИС, равная первой слагаемой в (7):

$$\Delta x_s = x_s - x_2 \quad (9)$$

Отличие АИС от АИВ заключается именно в полной утрате второго слагаемого (заштрихованная площадь исчезает). Потери в средней движущей силе всегда составляют

$$\Delta x_n - \Delta x_s = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2 - x_1}{x_s - x_1}} - (x_s - x_2) = \frac{\text{плос. I}}{h_1} \quad (10)$$

Допустим, что в реальном процессе, когда $0 < \beta < 1$, изменение концентрации в растворителе по высоте h_2 идет по кривой 2. В этом случае потери в средней движущей силе, по сравнению с АИВ, определяются разницей между заштрихованными площадями выше кривой 1 (площадь I) и выше кривой 2 (площадь II), а именно:

$$\Delta x_n - \Delta x = \frac{\text{плос. I}}{h_1} - \frac{\text{плос. II}}{h_2} \quad (11)$$

При $\beta = 0$ $\Delta x_n - \Delta x = 0$. С ростом β площадь II уменьшается, а h_2 растет [согласно (8)], т. е. уменьшается второй член правой части (11). При АИС этот член станет нулем и придем к выражению (10).

Сравнивая рисунки 2 и 3 нетрудно заметить следующее: когда заштрихованная площадь на рис. 2 достигает максимума (при АИНС, когда $\beta = 1$), на рис. 3 таковая исчезает, и наоборот, когда на рис. 2 исчезает заштрихованная площадь (АИВ, $\beta = 0$), то на рис. 3 таковая достигает максимума. Это обстоятельство подсказывает вывод (стро-го недоказанный, но, по-видимому, близкий к истине) о том, что по-тери в средней движущей силе пропорциональны коэффициенту про-дольного смещения β , т. е.

$$\frac{\Delta x_n - \Delta x}{\beta} = \frac{\Delta x_n - \Delta x_c}{1}$$

или

$$\Delta x = \frac{(x_2 - x_1)(1 - \beta)}{\ln \frac{x_s - x_1}{x_s - x_2}} + (x_s - x_2)\beta \quad (12)$$

Таким образом, при известном коэффициенте смещения β по (12) можно определить движущую силу Δx .

О соотношении $\Delta x_n/\Delta x_c$. Если аппарат, работающий в режиме идеального вытеснения, имеет высоту h_1 , то аппарат, действующий в режиме идеального смещения, при тех же f , x_1 , x_2 и W , должен иметь высоту h_2 , определяемую по (8). Соотношение высот

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\Delta x_n}{\Delta x_c} = \frac{(x_s - x_2) + \frac{\text{площ. 1}}{h_1}}{(x_s - x_2)} = 1 + \frac{\frac{\text{площ. 1}}{h_1}}{(x_s - x_2)} \quad (13)$$

Из (13) видно, что соотношение высот зависит от разницы $(x_s - x_2)$ и с ее уменьшением оно резко растет.

Например, если $x_1 = 0$, а $x_s = 0,3$, то соотношение h_2/h_1 или $\Delta x_n/\Delta x_c$ в зависимости от x_2 меняется следующим образом

x_2	0,05	0,10	0,20	0,25	0,27	0,29	0,295
$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\Delta x_n}{\Delta x_c}$	1,1	1,24	1,82	2,80	4,05	8,50	14,5

Из изложенного следует, что резкое увеличение продольного смещения в реальном аппарате может, в определенных условиях, привести к многократному снижению производительности единицы его объема (или единицы его высоты). Поэтому изучение влияния концентрации φ взвеси на коэффициент смещения β является важным.

Продольное смещение однородной жидкости. Продольное сме-щение частиц жидкости имеет место в любом потоке, в том числе и в потоке однородной, химически индивидуальной жидкости. Рассмотрим наиболее простой случай такого смещения — смещение в лами-нарном потоке.

Пусть по трубе рис. 4, в ламинарном режиме течет жидкость с равномерным объемным расходом W . Для определения степени про-

дольного смещения жидкости рассмотрим объем $V = W$, заключенный между сечениями I и II. В некоторый момент установившегося потока в горизонтальной плоскости I будут находиться определенные частицы жидкости. Жидкость, находящуюся в этот момент ниже сечения I, назовем „нижней“. Остальную — „верхней“. Через 0,5 сек частицы, находившиеся в начале секунды в плоскости I, окажутся на поверхности параболоида 1. Расход за это время составит $0,5 W = 0,5 V$, средняя концентрация „нижней“ жидкости в рассматриваемом объеме V составит 0,5, через сечение II еще не прошла „нижняя“ жидкость

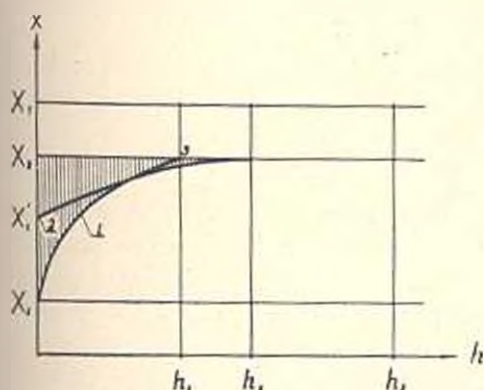


Рис. 3.

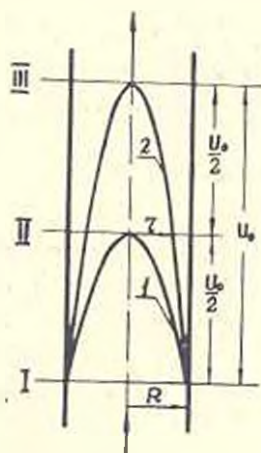


Рис. 4.

но вершина параболоида уже дошла до этого сечения, имея высоту $U_0/2$ (U_0 — осяевая скорость потока). Через одну секунду рассматриваемые частицы окажутся на поверхности параболоида 2, имеющего высоту U_0 . Через сечение II прошла жидкость общего объема $W = V$, в том числе „нижняя“ жидкость с объемом, равным объему верхней половины параболоида 2. Если бы имело место идеальное вытеснение, то в конце первой секунды объем между сечениями I и II оказался бы целиком заполненным „нижней“ жидкостью, а через сечение II еще не прошла бы эта „нижняя“ жидкость.

Объем параболоида 2 равен:

$$V = W = 0,5 U_0 \pi R^2. \quad (16)$$

Объем нижней половины параболоида 2 будет:

$$W_n = 0,25 U_0 \pi (R^2 + r^2). \quad (17)$$

Объем верхней половины:

$$W_n = W - W_n = 0,25 U_0 \pi (R^2 - r^2). \quad (18)$$

Величину радиуса r можно определить из параболического закона Стокса для ламинарного потока. Струи жидкости, достигшие за секунду сечения II, имеют скорость $0,5 U_0$, следовательно,

$$U = 0,5 U_0 = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) = k(R^2 - r^2). \quad (19)$$

Откуда, учитывая, что $U_0 = kR^2$, получается:

$$r^2 = 0,5 R^2. \quad (20)$$

Из (18) получается:

$$W_0 = 0,125 U_0 R^2 \quad \text{или} \quad W_0 = 0,25 W. \quad (21)$$

Таким образом, при ламинарном потоке, при $W_0:W = 1$, средняя концентрация «нижней» жидкости в ушедшей через сечение II «смеси» составит согласно (21), $x_2 = 0,25$.

Коэффициент продольного смешения в этом случае имеет значительную величину и составляет

$$\beta = 2,72 x_2 = 0,68.$$

Методика определения β . При разработке методики опытного определения коэффициента β мы исходили из необходимости получения сравнительных данных, т. е. данных о том, насколько наличие взвеси и ее концентрация φ увеличивают или уменьшают степень продольного смешения слоев жидкости.

Нами были разработаны два способа экспериментального определения величины β . Первый из них состоял в следующем.

В стеклянную колонку 1 (рис. 5) через трубку 2 с постоянной объемной скоростью w подавалась жидкость «А», отбираемая в приемник через отвод 4. После достижения стационарного режима потока по колонке, быстрым поворачиванием тройного крана 5 поток жидкости «А» заменялся потоком жидкости «В» с той же объемной скоростью w . Одновременно с этим засекалось время, а прием жидкости из отвода 4 переключался в другой приемник. С этого момента начинался также отбор проб из отвода 4 (через определенные промежутки времени) до тех пор, пока из отвода стала сливаться стопроцентная жидкость «В». Далее, взятые пробы анализировались на содержание жидкости «В» и по полученным результатам составлялся график, пример которого приведен на рис. 6. В качестве жидкости «А» служила деаэрированная вода комнатной температуры, а жидкостью «В» служили растворы чистой поваренной соли и повар. с той же температурой. На рис. 6 по оси абсцисс отложено количество жидкости «В», поданное в колонку во время опыта, выраженное через объем колонки V , по оси ординат — концентрации жидкости «В» в сливе из отвода 4. Нетрудно заметить, что горизонтально заштрихованная область I, представляющая собой x в выражении (6), должна быть равна вертикально заштрихованной области II, представляющей собой объем жидкости «А» (выраженный в долях объема колонки V), задержанный в колонке после подачи в нее жидкости «В» в объеме V . Значение x определено как среднее арифме-

тическое площадей областей I и II. Значение коэффициента β определено по (6).

При опытах с наличием извести навеска частиц кварцевого песка предварительно засыпалась в колонку, на сетку 6 (рис. 5). При подаче жидкости «А» частицы переходили во известь и оставались в таком

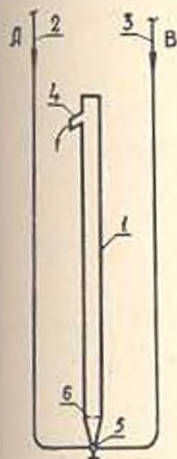


Рис. 5.

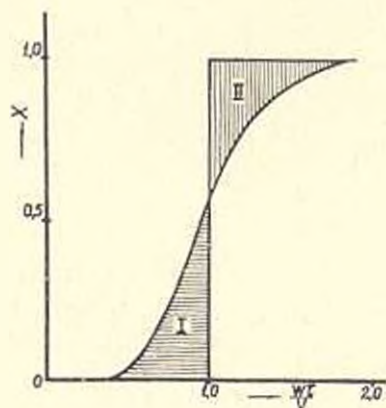


Рис. 6.



Рис. 7.

состоянии до конца опыта. Навеска частиц и скорость жидкости W подбирались так, чтобы при опыте почти вся колонка до отвода 4 была заполнена равномерной известью. Песок для опытов брался по возможности монодисперсный; узкая ситовая фракция подвергалась многократной гидросепарации для улучшения степени монодисперсности.

Второй метод определения β отличался от описанного тем, что анализ состава вытекающей из отвода 4 жидкости производился непрерывно, при помощи полярографа. Каломельный и капельно-ртутные электроды помещались в отвод 4 специальной конструкции. Жидкостями «А» и «В» служили, по-прежнему, вода и растворы поваренной соли. Фоном служила соль кадмия. Разработка деталей метода, его освоение и применение осуществлялись самой активной помощью Айказяна Э. А. и Исабекияна С. Е., за что авторы выражают свою глубокую признательность. Второй метод служил, в основном, как контроль для первого метода.

Определение β для разных участков аппарата. В колонке (рис. 7) коэффициенты смешения β_1 и β_2 для участков h_1 и h_2 могут быть различными. При определении β по вышеописанному способу, можно утверждать, что $\beta_1 > \beta_2$, так как на участке h_1 имеются факторы, вызывающие местное, более интенсивное смешение обеих жидкостей. Такими факторами являются: внезапное переклечение потоков, наличие тройного крана, расширение потока жидкости до диаметра колонки, наличие сетки внизу колонки и другие. Кроме того, установление окончательной эпюры скоростей, как известно, наступает после прохождения определенного пути, считая с места входа. Очевидно,

что местные эффекты смешения накладываются на истинное значение β колонны, искажая и увеличивая его.

Коэффициент β_2 может быть определен так: сначала опытом находят x_1 , отбирая жидкость через отвод 1, а затем, закрывая отвод 1 и отбирая жидкость через отвод 2, определяют x для всей колонны высотой h , xV будет объем жидкости „В“, проникшей в жидкость „А“, при прохождении „В“ до отвода 2 (V —объем колонки до этого отвода). x_1V_1 —то же самое, при прохождении „В“ с начала колонки до отвода 1 (V_1 —объем колонки до этого отвода). Очевидно, что $x_2V_2 = xV - x_1V_1$ представляет собой объем „В“, проникшей в „А“ на пути h_2 . Поэтому

$$x_2 = \frac{xV - x_1V_1}{V_2} \quad (22)$$

В (22) все величины, входящие в правую часть, определяются опытом. Зная x_2 , по (6) определяется β_2 . Аналогичным способом можно определять β для любого участка колонны (аппарата).

Институт органической химии
АН Арм. ССР

Поступило 24. V. 1971

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Է. Ա. ՄԵԼԻԿՅԱՆ

ՀԵՂՈՒԿԻ ԸՆԴԵՐՈՒՄՆԵՐԱԿԱՆ ԽԱՌՆԵՐԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ո մ

Հողվածք վերաբերում է մասսափոխանակման ինտենսիվության վրա հիդրոդինամիկական իրադրության ազդեցության ուսումնասիրությանը երկ ֆազ հոսքում, որը բաղկացած է հեղուկից և նրա մեջ կախված պինդ մաս ներկներին:

Առաջարկված է լեղելակայնական խառնման գործակից հասկացությունը և տրված է նրա քանակական ընդդրումը: Շարադրված է այդ գործակիցի մեծության փորձարարական եղանակով որոշման մեթոդիկան և տեսականորեն որոշված է նրա արժեքը համասեռ հեղուկի լամինար շարժման ժամանակ: Բացահայտված է լեղելակայնական խառնման գործակիցի ազդեցությունը շարժիչ ուժի միջին արժեքի վրա մասսափոխանակման ապարատում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М., Меликян Э. А. ДАН Арм. ССР, XXXIII, № 1, 1961.
2. Гаспарян А. М., Меликян Э. А. ЖПХ, т. XXXVI, 1963.
3. Гаспарян А. М., Икрян Н. С. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II.)», т. XV, № 2, 1962.
4. Пилинский А. И. «Химическая промышленность», № 5, 1944.
5. Пилинский А. И., Гуревич Д. А. Аппаратура промышленности и красителей. Госхимиздат, 1961.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

А. И. САГОЯН, К. Г. БАБАДЖАНИ

ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕДУРАХ ПОИСКА
НЕИСПРАВНОСТЕЙ*

За последнее десятилетие вышло много статей, посвященных вопросу построения оптимальных процедур поиска неисправностей. В них рассматриваются различные критерии оптимизации процедуры поиска, предполагаются различные допущения и ограничения и получены различные методы решения задачи. Вследствие отсутствия общего обзора этих методов, не четко представляются их общности и различия и место каждого из них в вопросе построения оптимальных процедур поиска неисправностей.

В настоящей работе сделана попытка несколько систематизировать ранее полученные результаты и указать вопросы, которые требуют дальнейшего рассмотрения.

Прежде чем перейти к рассмотрению поставленной задачи, введем обозначения, поскольку в различных работах одни и те же величины обозначены по-разному:

N — число компонентов системы;

P_i — вероятность неисправности i -го компонента системы ($i=1, 2, \dots, N$);

c_i — стоимость проверки i -го компонента системы;

ϕ_i — вероятность положительного исхода проверки i -го исправного компонента (т. е. i -й исправный компонент в результате проверки признан исправным);

ψ_i — вероятность отрицательного исхода проверки i -го неисправного компонента (т. е. i -й неисправный компонент в результате проверки признан неисправным);

T — стоимость общей проверки системы на работоспособность.

Здесь предлагаются пять признаков, по которым производится систематизация рассматриваемых работ:

1. Количество критериев оптимизации, принятых автором.

2. Количество неисправностей, предполагаемых в объекте диагностики.

* В порядке обсуждения.

3. Исходные данные, необходимые для решения задачи по данному методу.

4. Достоверность результата диагностики.

5. Связи между отдельными проверками.

Исходя из вышесказанного, построена таблица 1, в строках которой проставлены номера работ (см. список цитируемой литературы*), а в столбцах — номера пяти предложенных признаков; причем, каждый столбец разбит на два подстолбца в зависимости от отношения метода, рассматриваемого в работе к данному признаку. Тогда на пересечении k -й строки и j -го подстолбца ($k=1, 2, \dots, 9$; $j=1, 2, \dots, 10$) проставлен знак +, если методу, взятому из k -й работы, присуще определение, стоящее в верхней строке j -го подстолбца. В противном случае клетка (k, j) пустая. После знака в клетке может быть дополнительное пояснение. Например, в клетке (5, 5) стоит обозначение + (P_i, γ_i). Это означает, что для применения метода, взятого из [5], необходимо знать P_i и γ_i (для всех $i=1, 2, \dots, N$).

Таблица 1

№ работы	Метод и определение признака									
	1		2		3		4		5	
	Один критерий	Несколько критериев	Единичная не- исправность	Кратная не- правность	Параметры известны	Параметры неизвестны	Неопределен- ность проверки не допуск.	Неопределен- ность проверки допуск.	Проверки не- зависимы	Проверки за- висимы
1	+				(P_i, γ_i, T_i)			$\frac{1}{b_i} (\text{не} > 2)$	+	
2	+		+		$(P_i, \gamma_i = 1)$			$\frac{1}{b_i} = 1,$ $\gamma_i = c \neq 1$	+	
3	+		+		(P_i, γ_i, T_i)			$\frac{1}{b_i} = 1$	+	
4(1)	+		+		(P_i, γ_i)		+		+	
4(2)	+		+			(P_i, γ_i)	+		+	
4(3)	+		+		(P_i, γ_i)		+		+	
5	+			+	(P_i, γ_i)		+			+
6	+			+	$(P_i, \gamma_i, b_i, T_i)$		+	+	+	
7	+	(2критер.)		+	(P_i, γ_i)		+		+	
8	+			+	(P_i, γ_i)		+		+	
9(1)		(4критер.)	+		(P_i, γ_i)		+		+	
9(2)		(4критер.)			(P_i, γ_i)		+		+	
9(3)		(4критер.)	+		(P_i, γ_i)		+	+	+	

Для наиболее полного анализа таблицы следует сделать несколько замечаний.

а) Желательно рассматривать несколько критериев. Тогда, как указано в [9], при совпадении процедур поиска, оптимальных в смысле различных критериев, для построения программы поиска можно

* Если в данной работе рассматриваются несколько методов, то им отводятся отдельные строки: $k(l_1), k(l_2), \dots$; где k — номер данной работы, $l_1, l_2, \dots$ — номера соответствующих методов.

выбрать критерий, позволяющий наиболее просто рассчитывать оптимальную процедуру.

б). В современных сложных системах вероятность кратных неисправностей большая. Поэтому методы для отыскания таких неисправностей, представляющих особый интерес, эффективнее методов, ограничивающихся рассмотрением лишь единичных неисправностей.

в). Как правило, исходными данными для построения оптимальной процедуры поиска в большинстве случаев являются P_i и z_i . Даже приближенные вычисления этих параметров сопряжены с известными трудностями [1], [6], [8]. Поэтому естественнее считать более сильными методы, которые требуют меньше данных об объекте диагностики.

г). Современные устройства контроля сами являются сложными техническими объектами, в работе которых возможны сбои. Это приводит к неопределенности проверок объекта диагностики, в результате которой исправный компонент может быть ошибочно принят за неисправный, и наоборот. Поэтому большим достоинством обладают методы, учитывающие такие неопределенности.

д). Если объект диагностики предполагается состоящим из функционально связанных элементов, то представляются лучшими методы, учитывающие эти связи. Тогда проверка какого-либо компонента дает информацию о состоянии еще нескольких из непроверенных компонент, что позволяет исключить возможность неисправностей целой совокупности этих компонент, т. е. их проверку.

Учитывая вышеприведенные замечания, при просмотре табл. 1 можно заметить, что метод, обозначенный в правом подстолбце ν -го столбца ($\nu=1, 2, \dots, 5$), предпочтительнее метода, имеющего обозначение в левом подстолбце того же столбца.

Введем коэффициент эффективности d_{kj} :

$$d_{kj} = \begin{cases} 0 & \text{для пустых клеток;} \\ 1 & \text{для заполненных клеток, принадлежащих левым подстолбцам;} \\ 2 & \text{для заполненных клеток, принадлежащих правым подстолбцам.} \end{cases}$$

Отсюда, для каждого метода, взятого из работы с номером k , можно вычислить суммарный коэффициент эффективности:

$$D_k = \sum_{j=1}^{10} d_{kj}.$$

Например, для $k=6$

$$D_6 = \sum_{j=1}^{10} d_{6j} = 1 + 0 + 0 + 2 + 1 + 0 + 0 + 2 + 1 + 0 = 7.$$

Очевидно, $D_{k_{\max}} = 10$ (для любого k), что соответствует случаю, когда для данного k все заполненные клетки принадлежат правым подстолбцам.

Из таблицы видно, что наибольшее $D_k=7$ предлагают [4] (метод 2), [5; 7], [9] (метод 2). Однако, это не значит, что другие методы уступают перечисленным. Достоинства таблицы в другом: а) таблица показывает возможные пути дальнейшего повышения эффективности данного метода $D_k \rightarrow D_{kmax}$; б) позволяет выбрать наиболее подходящий метод для заданного объекта диагностики. Кроме того, таблица может расширяться за счет предложения новых методов, а также признаков, характеризующих эти методы.

Одним из авторов в отдельной работе коэффициент эффективности $D_k=7$ доведен до $D_k=8$ за счет перемещения знака + из клетки (5, 7) в клетку (5, 8).

В заключение следует отметить, что здесь рассматривались работы наиболее характерные (по нашему мнению) для построения оптимальных процедур поиска.

ЕрПН им. К. Маркса

Поступило 22. XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Firstman S. J., Gluss B. Optimum search routines for automatic fault location, Operation Research, 1960, vol. 8, № 4, p. 512-523.
2. Староверов О. В. Об одной задаче поиска. Теория вероятностей и ее приложения, 1963, т. VIII, вып. 2.
3. Любатов Ю. В. Оптимальная процедура локализации неисправности в модуляризованной радиоэлектронной системе. «Изв. АН СССР. Техническая кибернетика», 1964, № 4.
4. Hochm A. I., Saltz. Mathematical Model for Determination of Efficient Troubleshooting Routes, IRE Transactions, 1958, PG-RQC-13, July.
5. Кинигт Н. В. Об одной процедуре поиска неисправностей. «Автоматика», 1965, № 3.
6. Winter B. B. Optimal Diagnostic Procedures, IRE Transactions, 1960, RQC-9, №3.
7. Brule I. D., Johnson R. A., Kletsky E. I. Diagnosis of Equipment Failures, IRE Transactions, April, 1960, PRQC-9, № 1.
8. Kletsky E. I. An Application of the Information Theory to Failure Diagnosis, IRE Transactions, December, 1960, RQC-9, № 3.
9. Кинигт Н. В. О критериях оптимизации процесса поиска неисправностей. «Изв. СО АН СССР, сер. техн. наук», 1965, № 10, вып. 3.

Анализ влияния скорости и скорости итерации в расчетах электрических режимов энергосистем. Аюни Г. Г. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 3—10.

Предлагается алгоритм для исследования сходимости и скорости итерации в расчетах установившихся режимов электрических систем. Приводятся сведения и программа расчета на ЭВМ «Урал-11Д», реализующей предлагаемый алгоритм.

Библ. 7 назв.

УДК 621.313.333—752

Модель вибрации асинхронного двигателя. Бровман Я. С., Демирчян К. С., Шмутер С. Л. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 11—18.

С единых позиций рассматривается спектр вибраций, порожденных дефектом шарикоподшипников и системы «ротор—поле—статор» асинхронного двигателя. Путем применения дискретного преобразования Лапласа для смещенных решетчатых функций устанавливается зависимость спектра (гармонического ряда эллипса вибрации) от параметров дефекта при допущении ососредоточенности силового поля.

Илл. 3. Библ. 3 назв.

УДК 62—585.11

Стержневые механизмы для воспроизведения сложного движения объекта. Егишян К. М., Саркисян К. Л. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 19—29.

Предлагается общий метод образования кинематических схем стержневых механизмов, воспроизводящих сложное движение объекта. Для различных видов присоединяемых к объекту звеньев в векторной форме получены выражения условий связи, налагаемых этими звеньями. Комбинируя разные присоединяемые звенья, найдены и систематизированы некие стержневые одноподвижные механизмы со сложным движением ведомого звена. Приводятся основные схемы пространственных и плоских шарнирных механизмов, осуществляющих криволинейно-поступательное движение объекта. Описываются некоторые современные применения рассматриваемых механизмов.

Табл. 2. Илл. 3. Библ. 7 назв.

УДК 62—232.1+621.827.1

Синтез пространственного пятизвенного механизма по известным дискретным положениям шатуновой точки. Шахбазян К. Х., Гарабян С. Б. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 30—34.

Изложен синтез пространственного пятизвенного механизма по известным дискретным положениям шатуновой точки. Показано, что в общем случае задача решима для семи положений. Для пяти положений получено одно уравнение, являющееся основным расчетом при изложенном способе синтеза.

Илл. 1. Библ. 8 назв.

О сейсмостойкости многоэтажных каркасных зданий с убывающими по высоте поэтажными жесткостями. Гороян Т. А., Хачиян Э. Б., «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 35—43.

Анализируя частотные уравнения многоэтажных каркасных зданий с абсолютно жесткими ригелями при линейном законе убывания жесткостей этажей по высоте здания, предложена формула, позволяющая определять периоды первых трех низших тонов свободных колебаний таких зданий высотой до 20 этажей. Рассмотрены формы колебаний.

С целью оценки сейсмостойкости зданий с убывающими по высоте поэтажными жесткостями, проанализированы напряженные состояния конкретных 10-этажных железобетонных каркасных зданий с использованием акселерограмм четырех калифорнийских землетрясений интенсивностью в 7—8 баллов и ЭВМ. Отмечается, что убывание поэтажных жесткостей приводит к резкому усилению напряженного состояния верхних этажей при сейсмических воздействиях.

Илл. 4. Табл. 1. Библ. 4 назв.

УДК 532. 517. 2+532. 542

О продольном смещении жидкости. Гаспарян А. М., Мелкян Э. А., «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXV, № 3, 1972, 44—52.

В статье предложено понятие коэффициента продольного смещения и дано его количественное определение. Изложена методика экспериментального определения величины этого коэффициента и теоретически определена его величина в ламинарном потоке однородной жидкости. Определено влияние коэффициента продольного смещения на среднее значение движущей силы в массообменном аппарате.

Илл. 7. Библ. 5 назв.



ВФ 01737. Подписано к печати 24/X 1972 г. Тираж 510. Изд. 3807.

Заказ 136. Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Печ. л. 3,75. Бум. л. 1,88.
Усл. печ. л. 5,25. Уч. изд. листов 4,25.

Типография Издательства АН Армянской ССР, г. Эчмиадзин

Ր ՈՎ Ա Ն Գ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ ՈՒ Ն

Է Ե Ե Ր Գ Ե Ս Ի Կ Ա

- ա. Յ. Աղսնց, էնէրգահամակարգերի էջեկտրական օժիմիների շաղկերէներում իտերա-
ցիայի գուգումիտման և արագություն հետադոտությունների վերաբերյալ 3

Է Վ Ե Կ Ս Ր Ա Ս Ե Խ Ն Ի Կ Ա

- Յա. Ս. Բրովմուն, Կ. Ս. Մեմիլեյանի, Ս. Է. Շմուտև, Ապասիներուն էջեկտրաշարժիչի
վերաբերյալ մոդել 11

Խ Ե Ր Ե Ն Ա Շ Ի Ն ՈՒ Թ Յ ՈՒ Ն

- Կ. Մ. Աղիշյան, Յու. Է. Սարգսյան, Օրյէկտի բարդ շարժում վերաբերող լծակայի
մեխանիզմներ 19
Կ. Խ. Շահրազյան, Ս. Ս. Մարտիկյան, Տարածական էնգուլան մեխանիզմի օժիմիկը բառ
շարժամեխանիկ Կետի հայտնի դիսկրետ դիրքերի 30

Շ Ի Ն Ա Ր Ա Ր Ա Կ Ա Ն Վ Ե Խ Ա Ն Ի Կ Ա

- Տ. Ա. Պերսյան, Է. Խ. Խաչիյան, Բազմաշարժ կարկասային շենքերի սկումակայության
վերաբերյալ՝ երբ շարժների հոյտությունները և մագում են բառ շենքի բարձրության 35

Հ Ի Ղ Ր Ա Վ Ի Կ Ա

- Ա. Մ. Խաղապուս, Է. Ա. Մելիքյան, Հեղուկի բեղեկայանական իստեման վերաբերյալ 41

Գ Ի Ս Ա Կ Ա Ն Ն ՈՒ Ե Ր

- Ա. Ն. Սաղսյան, Կ. Կ. Սարգսյան, Անուարիներությունների վերաբերյալ օպտիմալ պրո-
ցեսսորանների վերաբերյալ 53

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика

- Г. Т. Адоцк, К исследованиям сходимости и скорости итерации в расчетах электрических режимов энергосистем 3

Электротехника

- Я. С. Броуман, К. С. Демирчян, С. Л. Шмидт. Модель вибрации асинхронного электродвигателя 11

Машиностроение

- Е. М. Есипян, Ю. Л. Саркисян. Стержневые механизмы для воспроизведения сложного движения объекта 19
К. Х. Шахбазян, С. Б. Гаринян. Синтез пространственного пятизвенного механизма по известным дискретным положениям шатуновой точки 30

Строительная механика

- Т. А. Гороян, Э. Е. Хачиян. О сейсмостойкости многоэтажных каркасных зданий с убывающими по высоте положительными жесткостями 35

Гидравлика

- А. М. Гаспарян, Э. А. Мелкян. О продольном смещении жидкости 44

Научные заметки

- А. И. Сагоян, К. Г. Бабаджанян. Об оптимальных процедурах поиска неисправностей 53